www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

PHILIPS TECHNISCH TIJDSCHRIFT

JAARGANG 30, 1969, no. 11/12

Experimenten in de hoge-energiefysica hebben zoveel nieuwe deeltjes en verschijnselen opgeleverd dat de kans op een eenvoudig wereldbeeld wel eens kleiner in plaats van groter scheen te worden. Maar het onderzoek gaat door: steeds meer experimentele feiten worden verzameld, en steeds machtiger machines worden gebouwd om die feiten aan het licht te brengen. De meest imposante machines, ontwikkeld voor dit doel, zijn de protonensynchrotrons, en hoewel het niet op de weg van de Philips-onderneming ligt zich aan de bouw van deze machines te wijden, kan toch met voldoening gewezen worden op een belangrijke technische bijdrage die Philips tot de realisatie ervan heeft geleverd. Die bijdrage is het onderwerp van een artikel in dit nummer: daarin worden de ferrietmaterialen behandeld die voor vijf protonensynchrotrons zijn ontwikkeld. De fascinatie die van deze machines uitgaat gaf ons aanleiding aan dit artikel een tweede toe te voegen, waarin alle vijf bedoelde machines nader bekeken worden. Dit artikel werd op ons verzoek geschreven door dr. Gouiran van CERN te Genève. In een inleiding tot de beide artikelen geeft prof. Casimir enkele beschouwingen over de voorgeschiedenis van de fysica der hoge energieën en over de rol die de industrie daarin heeft kunnen vervullen.

Bij het verzamelen van gegevens en illustraties hebben wij veel hulp ondervonden van leden der laboratoria die aan de onderhavige protonensynchrotrons zijn verbonden. Ook waren zij zo vriendelijk de aan de respectievelijke machines gewijde beschouwingen kritisch door te lezen. Mede namens de auteurs zouden we speciaal onze dank willen betuigen aan M. Plotkin van het Brookhaven National Laboratory; dr. C. Bovet, dr. H. Fischer, W. Pirkl en P. H. Standley van CERN; dr. J. H. Martin en dr. T. de Parry van het Argonne National Laboratory; D. A. Gray, T. Hyman en dr. D. J. Thomson van het Rutherford High Energy Laboratory te Chilton; en J. L. Kirchgessner van de Princeton-Pennsylvania versneller te Princeton.

Elektriseermachines, deeltjesversnellers en de industrie

H. B. G. Casimir

Elektrische ontladingsverschijnselen bij hoge spanningen zijn de mens van oudsher bekend: bliksem en donder vervulden hem met angstige bewondering. Het heeft lang geduurd voor men met kattevel en Leidse fles vonken van enige omvang kon voortbrengen; spoedig daarna zag men in dat deze in wezen hetzelfde verschijnsel zijn. Of, als men de zaak wil omdraaien, dat de atmosfeer een grote elektriseermachine is. Benjamin Franklin (1706-1790) leverde, al vliegerende, daarvan het bewijs. Een belangrijk stuk natuurkunde, en ook een treffend voorbeeld van een rationele verklaring voor een vroeger als grillig bovenaards machtsvertoon gevreesd verschijnsel.

Overigens lieten de fysici het niet bij kleine vonkjes. De grote wrijvingselektriseermachine van Van Marum (1750-1837), nu nog te bewonderen in Teyler's Museum te Haarlem, is een indrukwekkend toestel. Gedurende de negentiende eeuw werden nog vele, op wrijving en elektrostatische inductie berustende, elektriseermachines gebouwd.

Bij het verrichten van systematische laboratoriumexperimenten heeft de atmosferische elektriciteit als hulpmiddel verder nauwelijks een rol gespeeld, al heeft men omstreeks 1930 op de Monte Generoso nog wel eens een poging in deze richting ondernomen met langs de berghellingen opgehangen kabels. Daarentegen is de Van de Graaff-generator, een op industriële schaal vervaardigde moderne vorm van elektriseermachine, ook in de hedendaagse natuurkunde nog steeds een belangrijk hulpmiddel.

Het systematische onderzoek van ontladingsverschijnselen in verdunde gassen kwam tegen het einde van de negentiende eeuw tot grote bloei. De ontdekking van het elektron en van de röntgenstralen — van twee elementaire deeltjes, zou men tegenwoordig misschien zeggen — kwam er rechtstreeks uit voort. Het theoretische onderzoek van het elektromagnetische veld van een bewegend elektron leidde tot de conclusie dat de massa ervan niet onafhankelijk is van de snelheid

Prof. dr. H. B. G. Casimir, lid van de Raad van Bestuur van de N.V. Philips' Gloeilampenfabrieken en algemeen leider van de research van het Philipsconcern.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

(Abraham, Lorentz), een conclusie die ook door waarnemingen werd bevestigd. De speciale relativiteitstheorie gaf van dit verband tussen massa en snelheid een algemene en eenvoudige formulering. Voor de massa m van het bewegende elektron (lading e) geldt de formule:

$$mc^2 = eV + m_0c^2,$$

en voor de snelheid v:

$$m^2v^2 = m^2c^2 - m_0^2c^2.$$

Hierin is m_0 de massa van het elektron in rust, c de lichtsnelheid en V de elektrische spanning waardoor het elektron is versneld. De grootheid m_0c^2 is rond 500 000 elektronvolt. Pas bij spanningen van een half miljoen volt en meer worden de „relativistische effecten" dus zeer aanzienlijk. Dergelijke spanningen stonden ten tijde van het tot stand komen van de relativiteitstheorie nog niet ter beschikking.

Veel grotere deeltjesenergieën, namelijk verscheidene miljoenen elektronvolts, trof men reeds aan in de natuur, en wel bij deeltjes in de door radioactieve kernen uitgezonden straling. Dergelijke natuurlijke energierijke deeltjes waren de eerste hulpmiddelen waarmee kernfysica werd bedreven: Rutherford en zijn medewerkers vonden in 1919 een eerste aanwijzing dat door „radium C" uitgestraalde alfadeeltjes met een dracht van 7 cm in lucht (corresponderend met een energie van 7.7 MeV) desintegratie van een stikstofkern kunnen veroorzaken. Wanneer het mogelijk zou zijn bundels van deeltjes met vergelijkbare energieën maar met veel grotere intensiteit kunstmatig op te wekken, dan zou een geheel nieuwe aanval op de atoomkern mogelijk worden. De op 20 augustus 1968 in Amerika overleden fysicus van Russische afkomst Georg Gamow — in grotere kring bekend door zijn speelse geschriften over moderne natuurkunde en haar geschiedenis — betoogde dat ook energieën beneden een miljoen elektronvolt voldoende zouden kunnen zijn om kernreacties tot stand te brengen. Deeltjes met een dergelijke energie, te laag om de potentiaalbarrière om de kern te kunnen overschrijden, zouden *door* deze barrière heen kunnen tunnelen, en, eenmaal in het binnenste van de kern beland, desintegratie veroorzaken. „Ein Teilchen in Kern eindringt und ausruft Zertrümmerung" placht hij destijds in zijn niet geheel feilloze Duits te zeggen. Dit werd in 1932 bevestigd door Cockcroft en Walton, die lithium beschoten met protonen waarbij reeds bij een energie van 125 keV de protonen in merkbare mate bleken te kunnen reageren met een lithiumkern, met als eindprodukt twee zeer energierijke alfadeeltjes. De hierbij gebruikte protonen waren kunstmatig versneld met behulp van een nieuw type hoogspanningsgenerator, waarbij door een listige schakeling van condensatoren en gelijkrichters een wisselspanning wordt omgezet in een vele malen hogere gelijkspanning. Weliswaar bereikten Cockcroft en Walton daarmee niet meer dan 800 kV, toch was hier de kernfysica het technische stadium ingegaan.

Spoedig na de eerste proeven van Cockcroft en Walton werd te Eindhoven in het Philipslaboratorium een aantal op hetzelfde beginsel berustende generatoren in meer industriële uitvoering gebouwd. De generator voor 1,25 MV die in 1937 in het Cavendish-laboratorium te Cambridge werd geplaatst [1], kan bogen op een opmerkelijke staat van dienst. In 1965 zag ik hem in Johannesburg, waar hij nog steeds goede diensten bewees. De oorspronkelijke kwikdampgelijkrichters waren inmiddels vervangen door vastestofgelijkrichters en de condensatoren begonnen het langzamerhand op te geven. Ze waren echter ook niet ontworpen voor werk op 1900 meter hoogte, zodat men hen dit na 30 jaar niet al te zwaar mag aanrekenen.

Interessante kernfysische reacties kunnen worden teweeggebracht door deeltjes met zeer uiteenlopende energieën. Enerzijds vindt bij voorbeeld de reactie van de waterstofkern met atoomgewicht 3 (tritium) met de waterstofkern met atoomgewicht 2 (deuterium) reeds plaats bij energieën beneden de 100 keV, anderzijds vindt men, bij verhoging van de energie der beschietende deeltjes, telkens nieuwe reacties, nieuwe aangeslagen toestanden, nieuwe verschijnselen. Hoewel men er later in geslaagd is met behulp van Van de Graaff-machines spanningen van 5 MV en hoger te bereiken, kwam men aanvankelijk hiermee evenals met de Cockcroft-Walton-generator toch niet gemakkelijk boven 1 MV. Zo kwam men op het denkbeeld deeltjes te versnellen, niet door ze éénmaal een zeer hoge spanning te laten doorlopen, maar door ze met wisselspanningen herhaalde stootjes te geven. Dit wordt zowel in de lineaire versneller gerealiseerd als ook in het cyclotron. Beide principes werden bij vroegere gelegenheden ook in dit tijdschrift beschreven [2]. Op de verbluffende en soms wel verbijsterende vlucht die het kernfysisch onderzoek daarna heeft genomen, wil ik hier niet ingaan.

Zij aan zij met de kernfysica, gedeeltelijk gebruikmakend van gelijksoortige waarnemingsmethodes (ionisatievaten, wilsonvaten en geigertellers) liep een andere tak van onderzoek: dat van de kosmische stralen. Uit de wereldruimte bereiken snelle elektronen en andere vormen van straling de aarde. Daarbij komen deeltjes voor met energieën die zeer veel hoger zijn dan men kende uit de radioactieve processen of, toentertijd, kon

[1] A. Kuntke, Een generator voor zeer hoge gelijkspanning, Philips techn. T. **2**, 161-165, 1937.

[2] Voor cyclotrons, zie b.v. Philips techn. T. **12**, 65, 245, 353, 1950 en **14**, 291, 1952; voor de lineaire versneller Philips techn. T. **14**, 225, 1952 en **15**, 177, 1953.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

produceren met versnellers. Het was er enigszins mee als met het onweer ten tijde van Franklin, maar nu was de bron van het geweld niet de atmosfeer maar de wereldruimte. Een verrassende ontdekking bij dit onderzoek was die van het positon (het positieve elektron) door Anderson in 1932, hoewel het in zekere zin reeds was voorspeld door de theorie van Dirac. Men vond dat in de buurt van een atoomkern een gammaquantum van ten minste tweemaal een half miljoen elektronvolt kan worden omgezet in een positon-elektronpaar. Het kost ons nu enige moeite ons voor te stellen dat op het ogenblik dat Anderson zijn ontdekking deed de techniek nog niet in staat was röntgenstralen van de vereiste energie op te wekken. Het bleef overigens niet bij deze paarvorming. Bij de kosmische stralen kunnen ook grote „showers" van positonen en elektronen optreden. Daar is dan zoveel te meer energie voor nodig. Weinig later werd de kunstmatige radioactiviteit ontdekt, en het bleek toen dat een kunstmatig radioactieve kern die een overschot aan protonen bezit positonen uitzendt. Even belangrijk was de ontdekking van de „zware elektronen" of mesonen, die vooral zijn beslag kreeg door het werk van Powell, Occhialini en medewerkers in de jaren veertig; hun techniek was het waarnemen van deeltjessporen in fotografische emulsies. Ook deze deeltjes waren voorspeld en wel in 1935 door Yukawa, die ze had gepostuleerd ten einde rekenschap te kunnen geven van de korte dracht der specifieke kernkrachten die protonen en neutronen in de kern bijeenhouden. Dat de geniale, maar zeker kwalitatieve overweging van Yukawa op zo frappante wijze door het experiment werd bevestigd, blijft voor mij nog steeds één van de meest merkwaardige gebeurtenissen in de moderne fysica. Overigens was werk op het gebied van de kosmische stralen bijzonder aantrekkelijk voor natuurkundigen met neiging tot globetrotten en bergklimmen, want de eigenschappen van deze straling hangen op geprononceerde wijze af zowel van de breedtegraad op aarde als van de hoogte.

De intensiteit der kosmische stralen is echter gering. Wilde men de nieuwe deeltjes en de geheel nieuwe verschijnselen die zich bij hun optreden voordeden naar behoren onderzoeken, dan zou het nodig worden ze zelf op te wekken. Evenzo kwam de kernfysica immers pas goed vooruit toen men niet meer uitsluitend op radioactieve elementen was aangewezen. Om de eenvoudigste der „zware elektronen" op te wekken, moet men ten minste beschikken over een energie van maar liefst 500 MeV. En, evenals er in de kernfysica bij verhoging van de energie steeds nieuwe aangeslagen toestanden en nieuwe kernreacties werden gevonden, geeft ook in dit gebied der hogere energieën elke winst in energie aanleiding tot nieuwe deeltjes of nieuwe reacties. Iedere vooruitgang in de techniek der versnellers is tot nog toe belangwekkend geweest voor de fundamentele fysica. Zo werden de negatieve protonen prompt gevonden zodra er een energie van meer dan $2m_pc^2$ ter beschikking kwam (hierin is m_p de massa van het proton; m_pc^2 is globaal 1000 MeV).

Bij een tafelrede aan het slot van een CERN-conferentie heb ik eens betoogd dat men deze fysica der hogere energieën als de hoogste vorm van natuurkunde zou kunnen beschouwen, omdat men niet alleen zijn eigen experimenten ontwerpt, maar zelfs zijn eigen deeltjes maakt. Wat moet nu de houding van een industrielaboratorium zijn ten opzichte van dit van fundamenteel standpunt beschouwd zo fascinerende gebied? Tot nog toe is er generlei technische toepassing in zicht. Nieuwe energiebronnen doen zich niet voor, evenmin als nieuwe communicatiemiddelen of zeer bijzondere effecten op de levende materie, hoewel de therapie met „pionen" wel eens wordt overwogen. Daarmee is nog niet gezegd dat toepassingen nooit zullen komen en evenmin zou ik afbreuk willen doen aan de intrinsieke filosofische waarde van dit onderzoek. Het industrielaboratorium kan zich echter vooralsnog niet veroorloven zelfstandig dit terrein te betreden. Jammer genoeg geldt dit ook voor de bouw van versnellers. Cockcroft-Walton-generatoren, synchrocyclotrons en isochrone cyclotrons konden wij bouwen op eigen kracht en voor eigen rekening. Voor de grote versnellers gaat dit niet meer. Het project wordt te ingewikkeld, de markt is te klein, de investeringen zijn te groot. Zo wordt de rol van de industrie beperkt tot het leveren van onderdelen voor grote projecten, waarvan zowel het ontwerp als de doelstelling zich aan onze invloed onttrekt. Voor een laboratorium als het onze, dat gewend was van tijd tot tijd op onafhankelijke wijze een bescheiden bijdrage te leveren tot de ontwikkeling der instrumentatie aan de grenzen der natuurkunde, betekent het een zekere teleurstelling te moeten erkennen dat het niet meer in staat is dit te doen. Des te meer verheugt het ons dat door ons voor geheel andere doeleinden tot ontwikkeling gebrachte materialen voor deze projecten een nuttige, ja bijna essentiële rol spelen, zoals zal blijken uit de in dit nummer opgenomen artikelen.

Samenvatting. Ter inleiding van de volgende artikelen over vijf grote synchrotrons een historische schets van de pogingen om, zowel met natuurlijke als met technische middelen, steeds hogere elektrische spanningen te gebruiken en deeltjes van steeds grotere energie te betrekken bij het onderzoek van de elementaire deeltjes. Enkele stappen bij de daarmee hand in hand gaande groei van onze kennis van deze deeltjes worden aangegeven.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Ferroxcube voor protonensynchrotrons

F. G. Brockman, H. van der Heide en M. W. Louwerse

In 1952 werd te Brookhaven (Amerika) het eerste protonensynchrotron voltooid, het Cosmotron, dat protonen kon versnellen tot 3 GeV. De kern van het versnellingsstation van het Cosmotron bestond grotendeels uit ferriet dat door Philips werd geleverd (ferroxcube)[1]. Sindsdien heeft Philips soortgelijke materialen vervaardigd voor vijf andere protonensynchrotrons, te weten de 28-GeV-versneller van CERN te Genève, die in 1959 in werking werd gesteld, de 33-GeV-versneller te Brookhaven, Upton, N.Y., U.S.A. (1960), de 12,5-GeV-versneller te Argonne bij Chicago, U.S.A. (1963), de 7-GeV-versneller te Chilton, Engeland (1963), en de 3-GeV-versneller te Princeton, N.J., U.S.A. (1963).

Het doel van dit artikel is, het gebruik van ferroxcube in deze machines toe te lichten en de daarvoor vereiste eigenschappen van het materiaal te bespreken. Daartoe zullen we de principes van een protonensynchrotron kort samenvatten en de relevante eigenschappen van ferroxcube bespreken, en we zullen laten zien dat voor elk van de vijf machines een soort ferroxcube kon worden vervaardigd dat aan de speciale eisen was aangepast.

Daar wij dikwijls naar elk van deze machines afzonderlijk zullen verwijzen, vermelden wij hen hier nog eens met de afkortingen die ervoor gebruikelijk zijn:

1) CPS: het CERN-protonensynchrotron te Genève.
2) AGS: het „Alternating Gradient Synchrotron" te Brookhaven.
3) ZGS: het „Zero Gradient Synchrotron" te Argonne.
4) Nimrod: het 7-GeV-protonensynchrotron te Chilton.
5) PPA: de „Princeton-Pennsylvania Accelerator" te Princeton.

De verschillende soorten ferroxcube die in dit artikel worden behandeld zijn ontwikkeld toen deze versnellers werden ontworpen en gebouwd. Er zij op gewezen dat er sindsdien, met name bij Philips, nieuwe ontwikkelingen hebben plaatsgevonden in de ferriettechnologie die van grote betekenis zijn voor de modernisering van de synchrotrons. Zo zijn er voor de CPS en de AGS — waarin de protonen door resp. 15 en 12 stations in de ring worden versneld — geheel nieuwe versnellingsstations ontworpen, die zullen worden voorzien van de verkregen nieuwe ferrieten. Door de betere kwaliteit daarvan zullen deze stations zoveel effectiever zijn dat het aantal ervan gereduceerd zal kunnen worden, waardoor er kostbare ruimte vrijkomt voor experimenten.

Dr. F. G. Brockman, medewerker van Philips Laboratories, Briarcliff Manor, N.Y., U.S.A.; H. van der Heide, medewerker van Philips' Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven; M. W. Louwerse, medewerker van Philips' Hoofdindustriegroep Elcoma (Electronic Components and Materials), Eindhoven.

De grondslagen van een protonensynchrotron

In een protonensynchrotron (zie *fig. 1* en *2*) worden de protonen „geïnjecteerd" in een ringvormige *vacuümkamer*; zij worden in deze kamer in een gesloten baan gehouden door een *magnetisch afbuigveld*, dat gedurende de versnelling moet toenemen. Op een of meer plaatsen in de ring worden de deeltjes versneld door een *elektrisch veld*. Als zij hun eindenergie hebben bereikt, worden zij uit de ring „geëxtraheerd" of door inwendige trefplaten opgevangen; het magneetveld wordt vervolgens weer tot een lage waarde gereduceerd, waarna er een nieuwe cyclus begint.

De baan van een deeltje met lading e dat beweegt met impuls p loodrecht op een magneetveld van inductie B is gekromd, en de kromtestraal ϱ wordt gegeven door de betrekking [2]:

$$p = \varrho eB. \qquad (1)$$

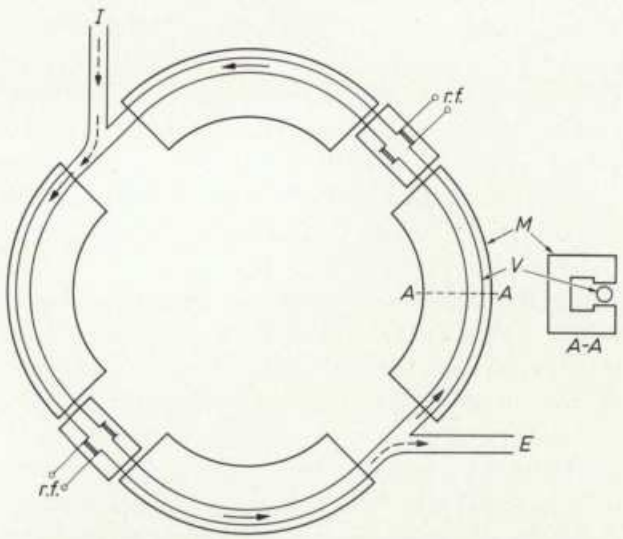


Fig. 1. Synchrotron voor protonen, schematisch. De protonen worden door afbuigmagneten M in een gesloten baan in de vacuümkamer V gehouden. Tussen de magneten is de baan recht. In de rechte stukken vindt de versnelling van de protonen plaats („*r.f.*"), de injectie van de protonen aan het begin van de cyclus (bij I), en de extractie (bij E).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Men ziet dat men B evenredig met p moet laten toenemen ten einde ϱ constant te houden.

Zoals in het volgende artikel in deze aflevering [3] uitvoeriger wordt besproken, geeft verg. (1) het verband tussen de afmeting en de eindenergie van de versneller. Immers, gezien het feit dat de eindwaarde van B begrensd wordt door verzadiging van het magneetstaal, en dat de eindenergie (in de relativistische limiet) evenredig is met p, volgt uit verg. (1) dat de eindenergie evenredig is met de straal. Zo is b.v. de AGS zowel in eindenergie (33 GeV) als in afmeting (straal 128,5 m) ongeveer 10× zo groot als de PPA (3 GeV; 12,5 m).

De deeltjes worden versneld door ze herhaaldelijk stootjes te geven met *elektrische wisselvelden* in „spleten" in de vacuümkamer (waar het metaal van de wand is vervangen door een isolator). Een essentiële eigenschap van een synchrotron is de *synchronisatie* van deze wisselvelden met de beweging van de deeltjes, zodat het mogelijk is dat een deeltje steeds als het de spleet passeert het veld in een versnellende faze aantreft. Daarmee hangt samen dat de deeltjes in pakketten worden versneld, waarbij de ruimte ertussen correspondeert met verkeerde fazen van het veld. Terwijl het deeltje wordt versneld neemt zijn snelheid en dus zijn omloopfrequentie gestadig toe, en de frequentie van de wisselspanning over de spleet moet deze verandering precies volgen.

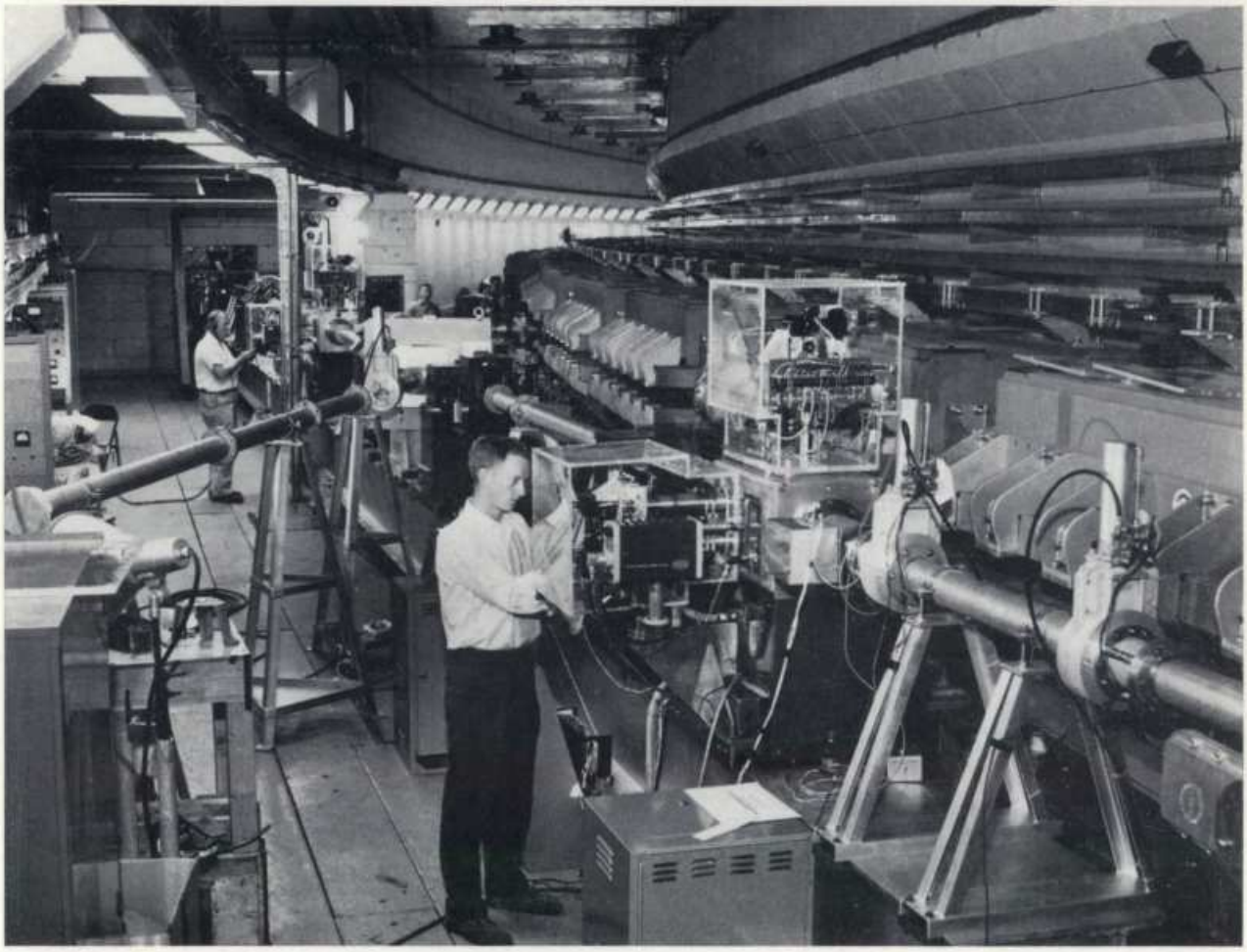


Foto Brookhaven National Laboratory

Fig. 2. Het 33-GeV Alternating Gradient Synchrotron (AGS) te Brookhaven. Afgebeeld is het gedeelte waar de injectie in de grote ring plaatsvindt.

De omloopfrequentie is de snelheid van het deeltje gedeeld door de omtrek. In het Cosmotron b.v. was de omloopfrequentie 0,36 MHz bij injectie en 4,2 MHz bij extractie. In de grotere versnellers met hun grotere omtrek is, althans bij extractie, waarbij de snelheid

[1] F. G. Brockman en M. W. Louwerse, De grote ferroxcubekern van het Cosmotron te Brookhaven, Philips techn. T. **15**, 249-259, 1953.

[2] De formules in dit artikel zijn aangepast aan het gebruik van SI-eenheden.

[3] R. Gouiran, Vijf protonensynchrotrons, blz. 341-378 in dit nummer.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

ongeveer de lichtsnelheid c is, de omloopfrequentie kleiner (b.v. 0,375 MHz bij extractie in de AGS). In de vijf besproken machines is de frequentie van het wisselveld (om redenen die elders worden besproken [3]) niet gelijk aan de omloopfrequentie maar een geheel veelvoud ervan. In de AGS is deze verhouding 12, en de eindfrequentie van het wisselveld is 4,45 MHz; bij injectie is de snelheid zodanig dat de wisselveldfrequentie 1,4 MHz is. Wij merken nog op dat de verhouding van de eind- en de beginfrequentie bij de AGS (4,45/1,4 = 3,2) kleiner is dan bij het Cosmotron (4,2/0,36 = 11,7); dit komt doordat de injectie-energie bij de AGS groter is, zodat de injectiesnelheid dichter bij c ligt.

Aan de versnellingsstations waarin de versnellende velden worden geproduceerd, komen de grote hoeveelheden ferroxcube te pas waarom het in dit artikel gaat. (Kleinere hoeveelheden worden verwerkt in andere onderdelen, b.v. koppeltransformatoren.) Versnellingsstations van de CPS en de AGS ziet men in *fig. 3* en *4*.

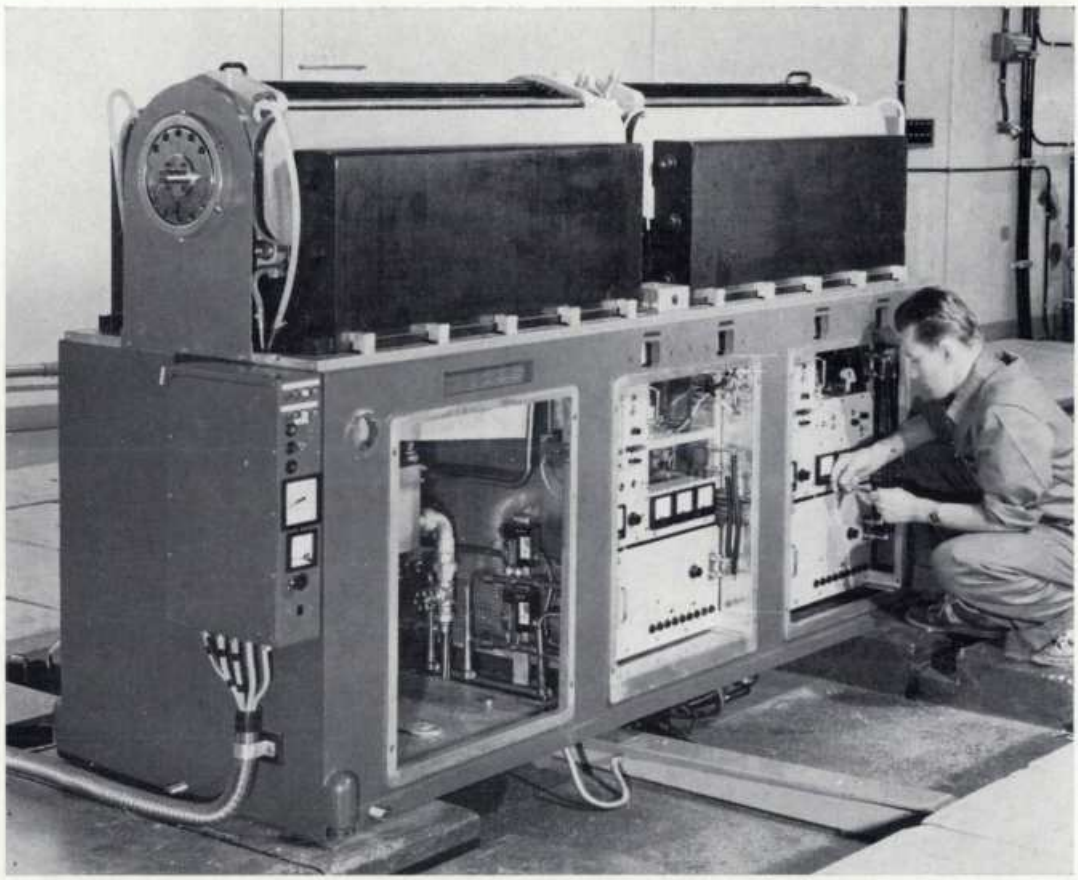


Foto CERN

Fig. 3. Een versnellingsstation van het CERN-protonensynchrotron (CPS) te Genève, vóór montage in de synchrotronring.

De versnellingsstations en de functie van het ferroxcube

Het schema van een versnellingsstation ziet men in *fig. 5*. Het is een afgeschermde cilindrische constructie, waarvan de as samenvalt met de protonenbundel, en die een spleet heeft waarin men sterke hoogfrequente elektrische velden kan produceren, zonder daarbij op de bundel, of elders, andere effecten te veroorzaken. Men kan de constructie beschouwen als een spoel met één winding. Een h.f. stroom in de spoel (d.w.z. in de wand van het apparaat) produceert een h.f. magnetische flux om de as, die op zijn beurt een h.f. spanning induceert over de uiteinden van de spoel, d.w.z. over de spleet. De amplitude $\hat{V}_\sim$ van de spleetspanning $V_\sim$ hangt samen met de amplitude $\hat{B}_\sim$ van de h.f. inductie $B_\sim$ volgens:

$$\hat{V}_\sim = \omega A \hat{B}_\sim, \qquad (2)$$

waarin ω de hoekfrequentie van de spleetspanning is en A de oppervlakte waar de flux doorheengaat.

Ten einde de deeltjes de vereiste versnelling te geven,

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

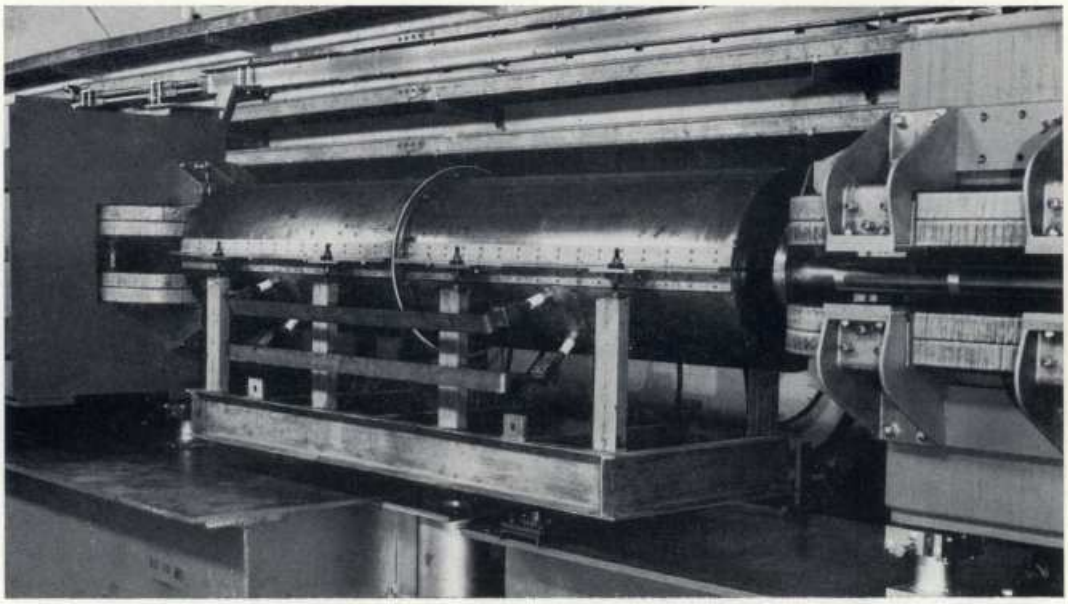


Foto Brookhaven National Laboratory

Fig. 4. Een versnellingsstation van de AGS te Brookhaven.

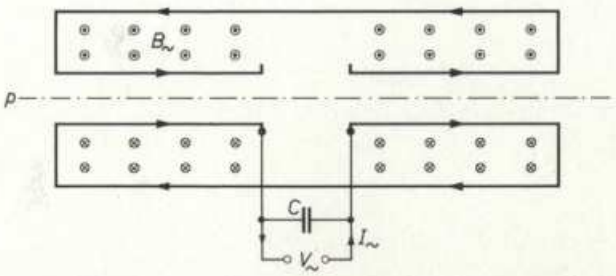


Fig. 5. Schema van een versnellingstrilholte. De protonenbundel p loopt langs de as van de cilindrische constructie. De trilholte kan als een eenwindingsspoel worden beschouwd. Een wisselstroom die in de trilholtewand wordt gestuurd produceert een wisselend magneetveld in de trilholte om de as, en de corresponderende wisselende inductie $B_\sim$ induceert een wisselspanning $V_\sim$ over de spleet. Met behulp van de uitwendige capaciteit C verkrijgt men een op de werkfrequentie afgestemde LC-kring.

moet $\hat{V}_\sim$ duizenden volts bedragen. Anderzijds zijn er aan de ingangsstroom grenzen gesteld doordat de vacuümbuizen van de h.f.-voeding slechts een beperkt vermogen kunnen dissiperen. Om nu de voor de vereiste spleetspanning nodige stroom zoveel mogelijk te beperken, moet men de *impedantie* van het versnellingsstation zo groot mogelijk maken.

Een grote impedantie verkrijgt men door twee maatregelen. In de eerste plaats kan de spoel worden voorzien van een ferromagnetische kern. Is de relatieve permeabiliteit van deze kern μ_r, dan wordt bij gegeven afmetingen de impedantie vergroot met een factor μ_r. Omgekeerd kan dank zij toepassing van een kern een gegeven impedantie met kleinere afmetingen worden gerealiseerd. Omdat de kern geen ongewenste verliezen mag introduceren, zijn bij de onderhavige frequenties ferrieten de enige bruikbare ferromagnetische materialen. In de tweede plaats kan men de impedantie nog verder vergroten door het versnellingsstation op te nemen in een LC-kring die afgestemd is op de werkfrequentie, en wel door een condensator op de uiteinden aan te sluiten (zie fig. 5). De impedantie Z in de twee gevallen is:

$$\text{niet-resonant geval: } Z \approx j\omega L, \quad \ldots \quad (3a)$$

$$\text{resonant geval: } Z \approx \omega Q_c L. \quad \ldots \quad (3b)$$

L is de zelfinductie en Q_c de kwaliteitsfactor, die de verliezen van de kring karakteriseert. De vergelijkingen (3a) en (3b) zijn alleen geldig als Q_c veel groter is dan 1. De absolute waarde van de impedantie Z is in het resonante geval Q_c maal zo groot als in het niet-resonante geval.

Men leidt de vergelijkingen (3a) en (3b) gemakkelijk af met behulp van de vervangschema's voor de beide gevallen (*fig. 6a* en *b*). R vertegenwoordigt de verliesweerstand van de zelfinductie L. De kwaliteitsfactor Q_c is $\omega L/R$, en voor de resonantiefrequentie ω_0 geldt: $\omega_0^2 = 1/LC$. Geval (*a*) is een speciaal geval van (*b*), met $C = 0$ ($\omega_0 = \infty$). De impedantie Z wordt gegeven door:

$$1/Z = j\omega C + 1/(R + j\omega L). \quad \ldots \quad (4)$$

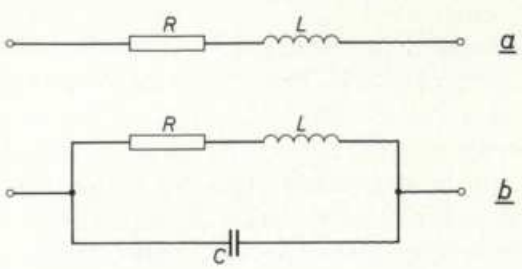


Fig. 6. Vervangschema van een niet-resonante trilholte (*a*) en van een met een capaciteit C afgestemde trilholte (*b*).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Introduceert men ω_0 en Q_c in plaats van C en R, dan vindt men bij benadering, voor $Q_c \gg 1$:

$$1/Z \approx (1/j\omega L)(1 - \omega^2/\omega_0^2 - 1/jQ_c). \quad . \quad . \quad (5)$$

Voor $\omega_0 \to \infty$ en onder verwaarlozing van $1/jQ_c$ ten opzichte van 1 leidt (5) tot verg. (3a); voor $\omega = \omega_0$ vindt men verg. (3b).

Terloops zij nog opgemerkt dat het *vermogen dat in de schakeling wordt gedissipeerd* voor een gegeven spanning evenredig is met het reële gedeelte van $1/Z$, dus in beide gevallen met $1/\omega Q_c L$ (zie verg. 5). Voor een gegeven spoel is dit vermogen derhalve steeds hetzelfde, of de spoel nu in een resonant systeem is opgenomen of niet.

Resonante constructies, vaak in de vorm van trilholtes, zijn veelvuldig toegepast om soortgelijke problemen op te lossen, b.v. in synchrotrons voor elektronen, en ook in allerlei andere hoogfrequentapparaten zoals klystrons, magnetrons, lineaire versnellers, enz. In deze toepassingen is de frequentie constant. In een protonensynchrotron daarentegen verandert de frequentie snel. Derhalve moet men kiezen tussen a) een niet-resonant systeem, waarbij men afziet van het voordeel van resonantie en poogt een zelfinductie te realiseren die voldoende groot is, en b) een resonant systeem dat op elk ogenblik *afgestemd* wordt op de snel veranderende omloopfrequentie van de deeltjes. In het eerste geval zullen de eisen die men aan de voedingsbron stelt relatief hoog zijn, in het tweede geval moet men speciale voorzieningen treffen om het systeem af te stemmen. De eerste oplossing werd gekozen bij het Cosmotron [4]. Voor de vijf hier besproken versnellers werd een resonant systeem gekozen. In deze vijf versnellers vervult het ferriet nu, naast het vergroten van de zelfinductie, de subtielere functie van *hulpmiddel bij het afstemmen van het systeem:* men varieert de resonantiefrequentie van het systeem, $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$, via de zelfinductie L, door het ferriet aan een variabel magnetisch voorveld bloot te stellen. Dit veld polariseert het ferriet, waarbij de permeabiliteit ervan voor relatief zwakke wisselvelden wordt gereduceerd; bij verzadiging nadert de relatieve permeabiliteit de waarde 1.

De resonantiefrequentie zou in principe ook gevarieerd kunnen worden door mechanische variatie van de capaciteit C in fig. 5; de beschreven niet-mechanische methode heeft het voordeel dat elektrische besturing met terugkoppeling gemakkelijker kan worden toegepast.

De versnellingseenheid van fig. 5 vertoont gelijkenis met een trilholte die bestaat uit twee tegenover elkaar geplaatste coaxiale $\frac{1}{4}\lambda$-resonatoren, die in „push-pull" resoneren. Een dergelijke trilholte kan ook met behulp van ferriet worden afgestemd. In de vijf synchrotrons zijn de trilholtesecties echter veel korter dan $\frac{1}{4}\lambda$, ten einde een gelijkmatige fluxverdeling in de axiale richting te verkrijgen; de trilholte is dus zelf niet resonant, maar wordt afgestemd met een uitwendige capaciteit. De twee helften van de versnellingseenheid zijn als het ware „*verkorte* coaxiale $\frac{1}{4}\lambda$-resonatoren".

Samenvattend is de functie van het ferriet:

a) de afmetingen van het versnellingsstation die nodig zijn om een voldoend hoge impedantie te verkrijgen te reduceren tot praktische waarden;

b) de mogelijkheid te verschaffen het versnellingsstation af te stemmen op de snel veranderende werkfrequentie.

Om deze functies goed te kunnen vervullen, moet het ferriet aan de volgende eisen voldoen:

1) De permeabiliteit moet voldoende groot zijn.

2) De magnetische verliezen in hoogfrequente velden moeten voldoende klein zijn, ofte wel, de kwaliteitsfactor Q moet voldoende groot zijn.

3) Een voldoende verlaging van de permeabiliteit voor hoogfrequente velden moet te verkrijgen zijn met een voorveld van redelijke sterkte.

Uit verg. (3b) kan men afleiden dat de eerste twee eisen gecombineerd kunnen worden tot de ene eis dat het produkt $\mu_r Q\omega$ steeds voldoende groot moet zijn.

Uit de uitdrukking voor de resonantiefrequentie van het systeem, $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$, volgt dat, afgezien van correcties voor vulfactoren e.d., de vereiste reductie in de permeabiliteit door polarisatie gegeven wordt door de factor

$$\frac{\mu_{max}}{\mu_{min}} = \left(\frac{f_f}{f_i}\right)^2, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (6)$$

waarin f_i en f_f de begin- en de eindomloopfrequentie zijn.

Neemt men aan dat de spleetspanningsamplitude $\hat{V}_\sim$ gedurende de gehele versnelling constant gehouden wordt [5], dan volgt uit verg. (2) dat de amplitude van de h.f. magnetische inductie omgekeerd evenredig met de frequentie is:

$$f_i(\hat{B}_\sim)_i = f_f(\hat{B}_\sim)_f. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (7)$$

De trilholtes

Alvorens de eigenschappen van de ferrieten te bespreken, zullen we in het kort de trilholtes van de vijf synchrotrons de revue laten passeren. Deze zijn in longitudinale doorsnede afgebeeld in *fig. 7*, alle op dezelfde schaal. In de eerste vier gevallen herkent men het basispatroon van fig. 5 gemakkelijk. Meer dan één spleet verkrijgt men door verkorte $\frac{1}{2}\lambda$-secties tussen de verkorte $\frac{1}{4}\lambda$-eindsecties in te voegen. De grootste tril-

[4] Hoewel het versnellingsstation van het Cosmotron in principe niet was afgestemd, traden er, ten gevolge van verdeelde capaciteiten, toch resonanties op; deze moesten zorgvuldig worden onderdrukt. Zie J. P. Blewett, M. Plotkin en E. J. Rogers, Rev. sci. Instr. **24**, 795-800, 1953, in het bijzonder blz. 798 en 799.

[5] In feite wordt de amplitude van de spleetspanning dikwijls sterk gevarieerd om de protonen bij de injectie beter op te vangen, het rendement van de versneller te verbeteren, enz.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

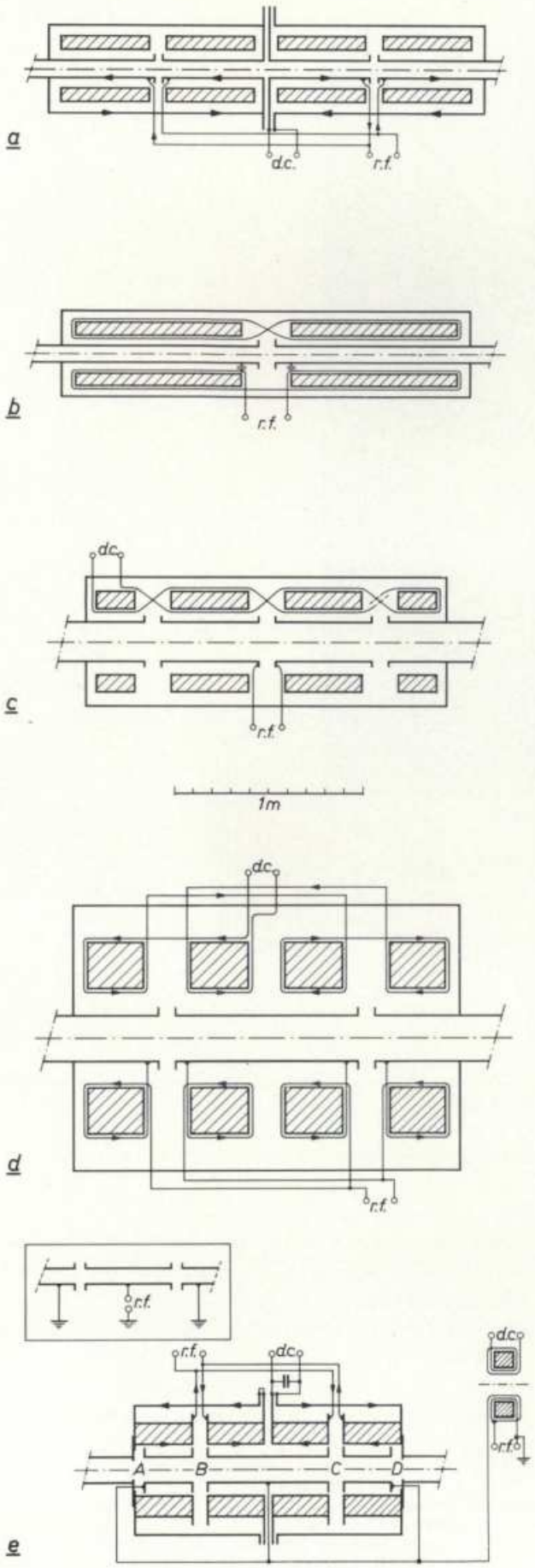
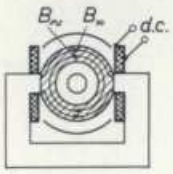


Fig. 7. Een versnellingsstation van elk der vijf machines, in lengtedoorsnede. *a*) AGS (Brookhaven), *b*) CPS (Genève), *c*) ZGS (Argonne), *d*) Nimrod (Chilton), *e*) PPA (Princeton). De ferrietkernen (gearceerd) zijn op schaal getekend; de trilholtewanden (dikke lijnen) en de leidingen (dunne lijnen) zijn schematisch. Bij het vergelijken van de afmetingen moet men er rekening mee houden dat de trilholtes van AGS, CPS en PPA in doorsnede cirkelvormig zijn, terwijl die van ZGS en Nimrod rechthoekig zijn; de langste zijde van deze rechthoeken staat loodrecht op het vlak van tekening. (Dwarsdoorsneden van de kernen ziet men in fig. 20.) In de eerste vier trilholtes herkent men gemakkelijk het patroon van fig. 5. Meer dan één spleet verkrijgt men door verkorte $\frac{1}{2}\lambda$-stukken in te voegen tussen de verkorte $\frac{1}{4}\lambda$-eindstukken. De aansluiting op de hoogfrequentbron is aangegeven met „*r.f.*", die op de stroombron voor het polariserende veld met „*d.c.*". Bij (*b*) zijn krachtlijnen van het h.f. veld en van het polariserende veld in de dwarsdoorsnede aangegeven (resp. $B_\sim$ en $B_=$).



In de PPA (*e*) wordt de versnelling in twee stappen uitgevoerd. In het eerste gedeelte van de cyclus worden de deeltjes versneld met behulp van een „loopbuis" (Engels „drift tube"). In de inzet van (*e*) is de werking van de loopbuis aangegeven: de spanning op de buis tussen de twee spleten verandert van teken in de tijd dat het deeltje de buis doorloopt, zodat het aan beide einden wordt versneld. In het PPA-versnellingsstation functioneert het binnenste stuk als loopbuis. De wisselspanning wordt op de drie stukken tegelijk gezet, zodat er alleen in de spleten *A* en *D* een wisselveld ontstaat. Gedurende het tweede gedeelte van de cyclus vindt de versnelling plaats door de trilholte om de loopbuis, waarbij het versnellende veld in de spleten *B* en *C* verschijnt. De loopbuis vormt met een uitwendige spoel een afstemkring, die ook weer op de veranderende frequentie wordt afgestemd door polarisatie van een ferrietkern in deze spoel. Wij merken nog op dat in een trilholte met verscheidene spleten de spanningen over de spleten in faze zijn; een deeltje „ziet" vrijwel dezelfde faze als het deze spleten passeert, aangezien de looptijd van spleet tot spleet klein is vergeleken met een periode van de wisselspanning. In een loopbuis daarentegen is de fazeverandering gedurende de looptijd essentieel.

holte is die van Nimrod te Chilton; deze is afgebeeld in *fig. 8*. In de PPA te Princeton wordt de versnelling in twee stappen uitgevoerd: in de eerste helft van de cyclus gebruikt men een „loopbuis" (waarvan de werking in het onderschrift van fig. 7 is verklaard), in de tweede helft een trilholte; de reden daarvoor is dat de vereiste frequentiezwaai te groot is om met ferrietafstemming in één stap te worden verkregen. In *fig. 9* ziet men een versnellingsstation van de PPA in aanbouw.

In fig. 7 is tevens aangegeven hoe het polariserende veld wordt verkregen. In de AGS, de ZGS, Nimrod en de PPA wordt dit gedaan met één of meer windingen om de ferrietkern (vaak doet de trilholtewand zelf als zodanig dienst). In deze gevallen wordt slechts een beperkt aantal windingen gebruikt, om wisselwerking met het h.f.-systeem te voorkomen; dit brengt grote polarisatiestromen met zich mee (van de orde van 1000 A). In de CPS wordt het ferriet gepolariseerd met een externe ijzerkernmagneet; het aantal windingen op deze magneet is relatief groot en voor de polarisatie zijn slechts enkele ampères nodig (zie *tabel I*). Koppe-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

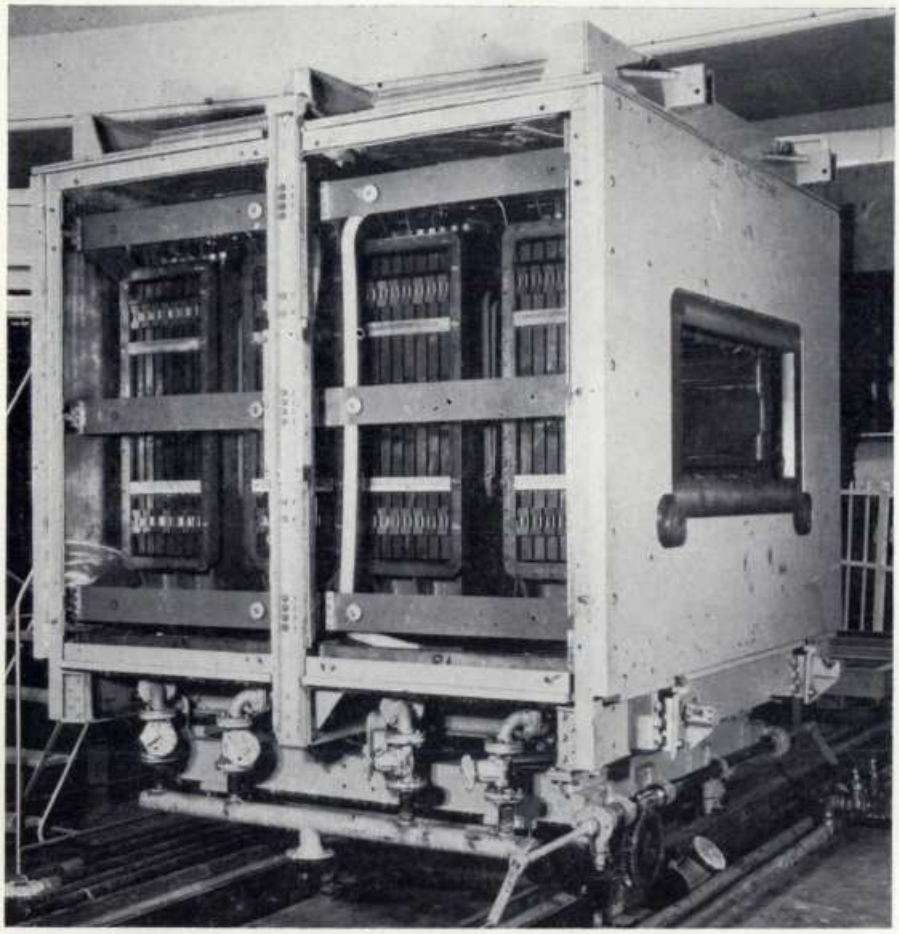


Fig. 8. Het versnellingsstation van Nimrod in aanbouw.

Foto Rutherford High Energy Laboratory

Tabel I. Maximum van polariserend veld en stroom (per trilholte).

	Maximum stroomsterkte in A	aantal windingen	$H_{p\,max}$ in A/mm	(in Oe)	μ_{max}	μ_{min}
AGS	850	1	1,0	(12)	400	40
CPS	1	2200 × 2 [*]	0,8	(10)	250	25
ZGS	650	20	4,2	(53)	176	9,5
Nimrod	800	10	1,2	(15)	557	12
PPA trilholte	14 000	1	10,8	(135)	150	3,5
PPA „loopbuis"-spoel	6	1000	4,8	(60)	150	8

[*] per trilholte 2 parallelle secties van 2200 windingen met 1A maximaal, die elk één van de twee ferrietkernen in de trilholte polariseren.

ling tussen de gelijkstroom- en de wisselstroomschakeling is ontoelaatbaar; deze voorkomt men door de windingen zo te leggen of de geometrie zodanig te kiezen dat het hoogfrequente veld en het polariserende veld op elk ogenblik gelijke richting hebben in één gedeelte van het ferriet en onderling tegengestelde richting in een ander, symmetrisch, gedeelte. *Fig. 10* toont de polarisatiewindingen van de trilholte van de ZGS.

De verschillende soorten ferroxcube

De meest markante eigenschap van ferrieten, als magnetische materialen, is hun hoge soortelijke weerstand, die ten minste 10^6 (en in sommige gevallen zelfs 10^{16}) maal zo groot is als die van ijzer en van magnetische legeringen. Dit maakt de ferrieten in het bijzonder geschikt voor toepassingen bij hoge frequenties, aangezien de hoge weerstand wervelstroomeffecten uitsluit. De bij de metallische magnetische materialen gebruikelijke methodes om wervelstroomverliezen te

[6] Zie b.v. het aangehaalde artikel [4], in het bijzonder blz. 795.

[7] J. L. Snoek, Niet-metallisch magnetisch materiaal voor hoge frequenties, Philips techn. T. **8**, 353-360, 1946. Zie verder J. L. Snoek, New developments in ferromagnetic materials, Elsevier, Amsterdam 1947.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

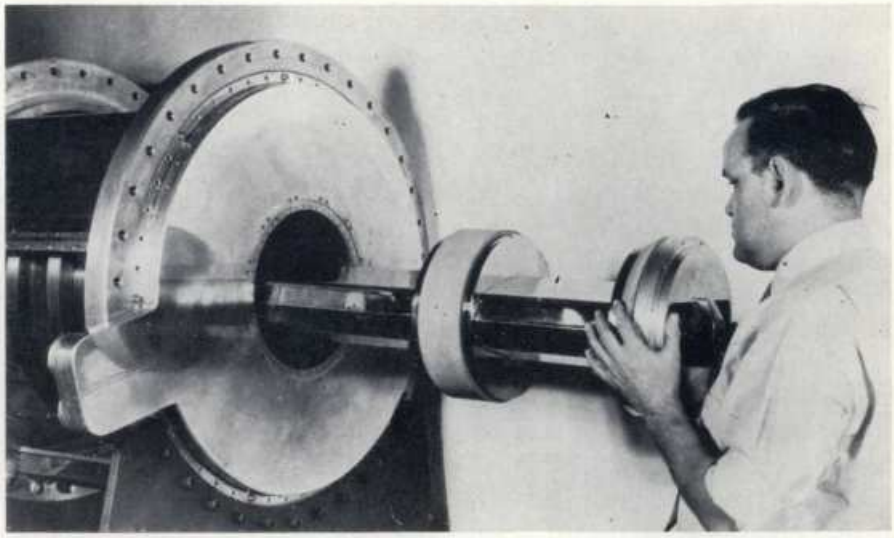


Fig. 9. Een PPA-versnellingsstation in aanbouw. De loopbuis wordt in de trilholte aangebracht. Aan het uitsteeksel dat naar links wijst wordt de met de loopbuis gekoppelde spoel gemonteerd.

Foto Princeton-Penn Accelerator

voorkomen: het lamelleren van de kern of het gebruik van poederkernen, zijn onvoldoende om deze materialen voor de hier besproken toepassing geschikt te maken: de toelaatbare dikte van de lamellen wordt onpraktisch klein en met poederkernen kan men de vereiste permeabiliteit niet bereiken [6].

De ferrietindustrie ontstond ongeveer 20 jaar geleden in aansluiting op de belangrijke onderzoekingen van J. L. Snoek [7]. Deze liet zien dat men nuttige materialen kan verkrijgen door mengkristallen te maken van de toen reeds bekende magnetische ferrieten met een niet-magnetisch ferriet (b.v. zinkferriet). In de loop der jaren zijn er twee groepen ferrieten naar voren gekomen die bijzonder bruikbaar zijn gebleken: de mangaan-zink-ferrieten (ferroxcube 3) en de nikkel-zink-ferrieten (ferroxcube 4). Verderop zullen we zien dat ferrox-

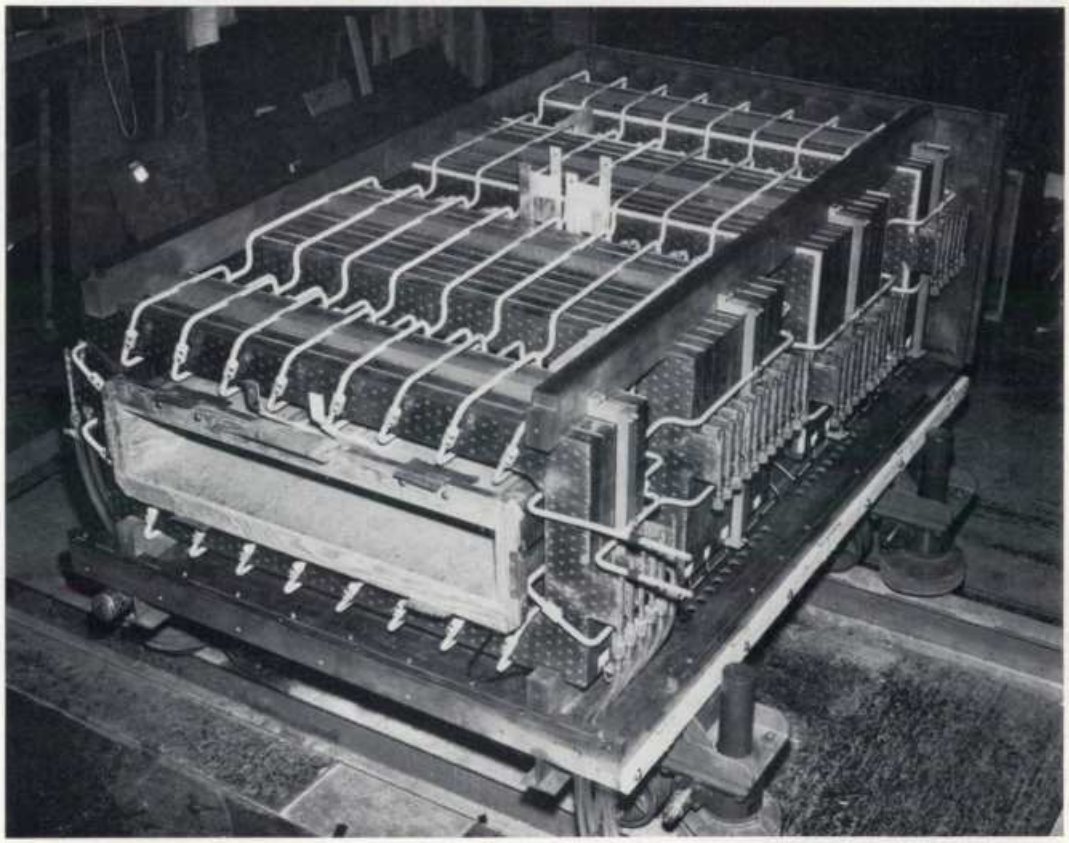


Foto Argonne National Laboratory

Fig. 10. De ferrietramen voor de ZGS, gemonteerd op een dummie-vacuümkamer. De twintig polarisatiewindingen om telkens een groep van ferrietramen zijn duidelijk te zien. Tussen de ramen zijn platte koperen kanalen gemonteerd waardoor men het koelwater laat stromen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

cube 3 ondanks enkele zeer aantrekkelijke magnetische eigenschappen voor de hier beschreven toepassing niet bruikbaar is, wel echter, met de nodige voorzorgen, ferroxcube 4. Dit is het materiaal dat in de vijf hier besproken versnellers is verwerkt.

Het bereiden van een ferriet voor een zeer gespecialiseerde toepassing als die waarvan hier sprake is impliceert een speciale ontwikkeling van het materiaal. Het ontwerp van een versnellingsstation — slechts één van de vele nauw met elkaar samenhangende elementen in het hoogst gecompliceerde geheel van een protonensynchrotron — berust mede op de door de ferrieten geboden mogelijkheden, en de ontwerpers gaan om te beginnen uit van de specificaties van materialen die reeds op de markt zijn gebracht. De mogelijkheden die de ferrieten bieden worden echter steeds ruimer door het onderzoek en de ontwikkeling die, ook met het oog op dit speciale doel, door de fabrikanten worden verricht.

Terwijl de specificaties die ten slotte door de synchrotronbouwers worden opgesteld gewoonlijk het resultaat zijn van een uitwisseling van denkbeelden over wat wenselijk en wat mogelijk is, komt het wel voor dat er een specificatie bij is die een uitdaging vormt voor de fabrikant. In dit artikel zullen we zien hoe Philips, als pionier in de ferrietindustrie goed toegerust met middelen voor het onderzoek, de ontwikkeling en de fabricage van deze materialen, erin is geslaagd dergelijke uitdagingen te beantwoorden.

In het volgende zullen we onderscheid maken tussen twee richtlijnen bij het pogen aan een bepaald stel specificaties te voldoen. In de eerste plaats kunnen de verschillende soorten ferroxcube gerangschikt worden naar hun *nominale chemische samenstelling*, en men moet nagaan welke soort het meest geschikt is voor het doel. In de tweede plaats zal zelfs de beste samenstelling ongewenste eigenschappen vertonen als het materiaal niet zeer zorgvuldig is bereid, en het is een kwestie van *technologie* om een produkt te maken van voldoende homogeniteit, stoechiometrie, mechanische sterkte, enz.

Invloed van de chemische samenstelling op de eigenschappen

De elektrische eigenschappen

Ofschoon de mangaan-zink-ferrieten (ferroxcube 3) enkele zeer gunstige magnetische eigenschappen hebben: een grote permeabiliteit (1000 of hoger) en geringe hysteresisverliezen, zijn ze toch niet geschikt voor het onderhavige doel, en wel voornamelijk wegens twee ongewenste elektrische eigenschappen: ze hebben een betrekkelijk lage soortelijke weerstand ϱ (omstreeks 1 Ωm) en een zeer grote relatieve diëlektrische constante ε_r (enkele tienduizenden). De lage ϱ brengt grote wervelstroomverliezen met zich mee, de grote ε_r, gekoppeld aan een grote μ_r, een resonantieverschijnsel („dimensionele resonantie" [8]), dat eveneens tot onaanvaardbare verliezen aanleiding geeft.

Om er zeker van te zijn dergelijke ongewenste effecten te vermijden, kan men specificaties voor ε_r en ϱ opstellen. Met een relatief lage weerstand is het bestaan van relatief grote diëlektrische verliezen nauw verbonden, en om deze te vermijden kan men een minimale elektrische kwaliteitsfactor Q_ε eisen. Dergelijke elektrische specificaties vindt men in *tabel II*.

Tabel II. Specificaties voor het ferriet betreffende ϱ en ε_r.

AGS	$\varepsilon_r < 20$ (bij 1,5 MHz)
CPS	$\varepsilon_r < 12$ (bij 2 MHz)
ZGS	$\varepsilon_r < 20$ (bij 14 MHz)
Nimrod	$\varepsilon_r < 20$, $Q_\varepsilon > 5$, $\varrho > 0{,}2 \times 10^4$ Ωm (bij 1,2-8,1 MHz)
PPA	$\varepsilon_r < 12$, $Q_\varepsilon > 25$ (bij 30 MHz en 1 kV/cm)

Mits met voldoende zorg bereid, kan ferroxcube 4, met zijn hoge soortelijke weerstand en kleine diëlektrische constante, gemakkelijk aan deze specificaties voldoen. Dit materiaal is gebruikt in de versnellers, en de verdere discussie zal worden beperkt tot ferroxcube 4.

Of wervelstroomverliezen al dan niet van belang zijn, kan ruwweg worden nagegaan door de dikte D van de gebruikte stukken ferriet te vergelijken met de theoretische indringdiepte d van de h.f. velden, $d = \sqrt{2\varrho/\omega\mu_r\mu_0}$ (skineffect). Om de wervelstroomeffecten te mogen verwaarlozen, moet $d \gg D$ zijn. In ons geval is $D = 1$ à 2 cm (zie fig. 20). Voor ferroxcube 3 met $\varrho = 1$ Ωm, $\mu_r = 10^3$ krijgen we bij $\omega = 2\pi f = 2\pi \times 10^6$ s^{-1}: $d = 1{,}7$ cm. Anderzijds vinden we voor ferroxcube 4, met $\varrho = 4 \times 10^4$ Ωm en $\mu_r = 100$, bij dezelfde frequentie: $d = 10$ m. In ferroxcube 3 kunnen de wervelstroomverliezen derhalve niet worden verwaarloosd, maar in ferroxcube 4 vormen zij geen probleem.

„Dimensionele resonantie" is het optreden van staandegolfeffecten, die merkbaar worden als de golflengte van de elektromagnetische golven in het materiaal zo klein wordt (ten gevolge van zeer grote waarden van ε_r en μ_r) dat een halve golf past in de kleinste afmeting van de ferrietkern loodrecht op de magnetische flux. Voor $\varepsilon_r = 50\,000$, $\mu_r = 1000$, $f = 10^6$ Hz is de golflengte $\lambda = c/f\sqrt{\varepsilon_r\mu_r} \approx 4$ cm, zodat in ferroxcube 3 de situatie waarin $D \approx \lambda/2$, en daarmede dimensionele resonantie, gemakkelijk optreedt. Dit effect brengt een afneming van de schijnbare permeabiliteit en van de schijnbare Q met zich mee. Voor ferroxcube 4 daarentegen, met b.v. $\varepsilon_r = 10$, $\mu_r = 100$, bij $f = 10^6$ Hz, vindt men $\lambda = 10$ m, zodat er geen gevaar is voor dimensionele resonantie.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

De magnetische eigenschappen

De magnetische eigenschappen die van praktisch belang zijn voor de besproken toepassing — de permeabiliteit, de beïnvloedbaarheid van de permeabiliteit door een voorveld, en de magnetische verliezen — hangen onderling ten nauwste samen, en zij houden natuurlijk verband met andere magnetische eigenschappen, zoals de magnetische anisotropie, de coërcitie en de verzadigingsmagnetisatie. Voor een kwalitatief begrip van deze samenhang zullen we in hetgeen volgt ook moeten ingaan op de microscopische verschijnselen die ten grondslag liggen aan het magnetisatieproces.

a) De permeabiliteit

De permeabiliteit μ_r waar wij in het voorgaande in feite steeds mee te maken hebben gehad is de relatieve *incrementele permeabiliteit*; het is de permeabiliteit voor wisselvelden met een amplitude die klein is vergeleken met de amplitude van het voorveld. Polariseert men het ferriet met een (quasistatisch) voorveld dat periodiek varieert tussen grote positieve en grote negatieve waarden, dan doorloopt het een hysteresislus in het *B-H*-vlak (*fig. 11*). Superponeert men nu bij een bepaalde polarisatietoestand (b.v. *A* in fig. 11), een klein (evenwijdig) wisselveld op het voorveld, dan beschrijft het ferriet een plaatselijk lusje in het diagram, en de helling van dit lusje — die afhangt van de polarisatie — is de relatieve incrementele permeabiliteit $\mu_r = \hat{B}_\sim/\mu_0\hat{H}_\sim$. Een speciaal geval is de *beginpermeabiliteit* μ_i, d.i. de μ_r in de ontmagnetiseerde toestand, voor $\hat{H}_\sim \to 0$ [*].

Fig. 11 moge er tevens toe dienen de begrippen *coërcitie* H_c en inductie bij *remanentie* B_{rem} in herinnering te roepen.

Microscopisch gezien, is het materiaal verdeeld in magnetische gebiedjes. Elk gebiedje is magnetisch verzadigd. Binnen elk gebiedje heeft de magnetisatie zekere „voorkeursrichtingen", ten gevolge van de magnetische anisotropie van het materiaal. In de ontmagnetiseerde toestand zijn de magnetisaties van de gebiedjes willekeurig gericht, en de gemiddelde magnetisatie is nul. Magnetisatie van het lichaam als geheel vindt plaats door twee processen: a) draaiing van de magnetisatie in elk gebiedje, van de voorkeursrichting af; b) verschuiving van de wanden tussen de gebiedjes; bij dit tweede proces groeit een gebiedje dat gunstig is gemagnetiseerd met betrekking tot het veld, ten koste van naburige gebiedjes. In zeer sterke velden zijn alle elementaire magnetische momenten gericht en het materiaal is verzadigd; *de magnetische polarisatie bij verzadiging* J_s wordt bepaald door grootte en concentratie van de elementaire magnetische momenten. Het optreden van hysteresis vindt zijn verklaring hierin dat sommige processen, b.v. de wandverschuivingen, niet zuiver reversibel zijn.

De magnetische anisotropie kan het gevolg zijn zowel van de anisotropie van de kristalstructuur (die aanleiding geeft tot de „magneto-kristallijne anisotropie") alsook van inwendige spanningen in het materiaal. Een lokale verandering van magnetisatie is „voordelig" als de lokale verandering in afmetingen die (ten gevolge van *magnetostrictie*) daarmee gepaard gaat, een meegeven met de lokale spanning inhoudt. Een maat voor de totale anisotropie is de *anisotropieconstante* K, of ook het *anisotropieveld* $H_A = 2K/J_s$. Een lokaal magnetisch moment is aan zijn voorkeursrichting gebonden als door een magneetveld H_A in deze richting.

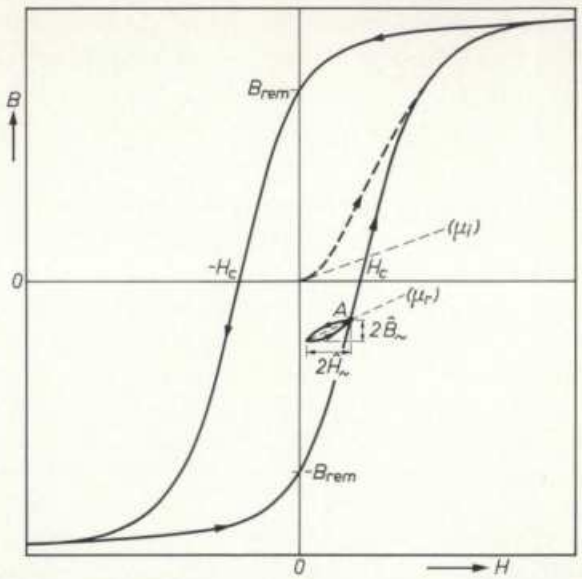


Fig. 11. De hysteresislus van een ferromagnetisch materiaal in een veld dat varieert tussen grote positieve en negatieve waarden (schematisch). Legt men, bij een polarisatietoestand A van het materiaal, een wisselveld van kleine amplitude $\hat{H}_\sim$ aan, dan beschrijft het materiaal een lusje, dat nauw is als de verliezen klein zijn. De *incrementele permeabiliteit* μ_r is de helling van dit lusje, $\mu_r = \hat{B}_\sim/\mu_0\hat{H}_\sim$. In de ontmagnetiseerde toestand, en voor $\hat{H}_\sim \to 0$, verkrijgt men de *beginpermeabiliteit* μ_i. Als het materiaal vanuit de ontmagnetiseerde toestand gemagnetiseerd wordt, doorloopt het de „maagdelijke kromme" (gestreept), waarbij de incrementele permeabiliteit (niet te verwarren met de helling van de raaklijn) gestadig afneemt. H_c is de coërcitie, B_{rem} de inductie bij remanentie.

De verschillende soorten ferroxcube 4 kunnen door de chemische formule $Ni_{(1-x)}Zn_xFe_2O_4$ worden voorgesteld. In de tijd dat de synchrotrons werden ontworpen kon men beschikken over vijf normaal in de handel gebrachte soorten, aangeduid met 4A tot 4E, waarbij x in de chemische formule afneemt van 0,64 tot 0. (Thans is het assortiment veel uitgebreider [9].)

[*] De μ's die in dit artikel voorkomen zijn alle relatieve permeabiliteiten. De index r die dient om dit aan te geven laten we weg als μ van andere indices of van accenten wordt voorzien.

[8] F. G. Brockman, P. H. Dowling en W. G. Steneck, Phys. Rev. **77**, 85-93, 1950. Zie ook F. G. Brockman en M. W. Louwerse [1].

[9] Zie b.v. Philips Data Handbook, Components and Materials, deel 4, maart 1969.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Tabel III. Representatieve waarden van diverse parameters voor ferroxcube 4. Deze waarden zijn hoofdzakelijk ontleend aan Went en Gorter [10]. Voor de coërcitie en de diëlektrische constante bij hoge frequenties, zie ook [11].

Ferroxcube		4A	4B	4C	4D	4E
Magnetische polarisatie bij verzadiging J_s	in tesla [*]	0,3665	0,4170	0,4030	0,3550	0,2460
Beginpermeabiliteit μ_i		650	230	90	45	17
tg δ bij 0,1 MHz (voor kleine $\hat{B}_\sim$)		0,013	0,015	0,010	0,006	0,006
Frequentie waarvoor tg $\delta = 0{,}1$ (voor kleine $\hat{B}_\sim$)	in MHz	1,5	5,5	16	29	60
Soortelijke weerstand ϱ	in Ωm	$> 4\times10^4$	$> 4\times10^4$	$> 4\times10^4$	$> 4\times10^4$	$> 4\times10^4$
Coërcitie H_c	in A/m	30	120	300	650	1100
	(in Oe)	(0,4)	(1,5)	(4)	(8)	(14)
(Relatieve) diëlektrische constante bij hoge frequenties, ε_r		15	15	15	15	15
Curie-temperatuur	in °C	140	265	385	465	585

[*] 1 tesla = 10^4 gauss.

De verandering in eigenschappen die optreedt als men van de soort A via B, C en D naar E gaat kan kwalitatief worden beschreven door te zeggen dat men van een zachter naar een harder materiaal gaat. In het zachtste ferriet (A) zijn de inwendige krachten betrekkelijk klein, hetgeen inhoudt dat de anisotropie gering is en de wanden van de gebiedjes „los" zitten. De magnetische momenten geven dus gemakkelijk mee met het uitwendige veld, zodat de permeabiliteit groot is; zie *tabel III*. Voorts is de coërcitie klein en het Curiepunt laag. Hysteresislussen van de zachtste soort (A) en de hardste soort (E) zijn afgebeeld in *fig. 12*. De permeabiliteit wordt verder bepaald door grootte en concentratie van de elementaire magnetische momenten, d.w.z. door de verzadigingspolarisatie J_s. J_s hangt echter niet sterk van de samenstelling af, en de variatie van μ_r met de samenstelling is hoofdzakelijk een kwestie van hardheid of zachtheid van het materiaal.

Voor het onderhavige doel moet de permeabiliteit voldoende groot zijn, met andere woorden: *het ferriet moet voldoende zacht zijn.*

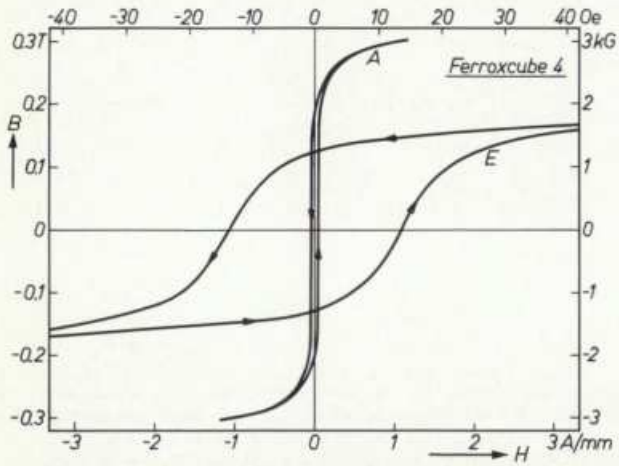


Fig. 12. De hysteresislussen van ferroxcube 4A en 4E.

b) De variatie van de permeabiliteit door polarisatie

Bij een relatief hard ferriet is het voorveld dat nodig is om het te verzadigen relatief groot (vgl. fig. 12), en dit geldt dus ook voor het voorveld dat nodig is om de permeabiliteit met een gegeven factor te reduceren; zie het experimenteel gevonden verband voor de vijf soorten ferroxcube 4 in *fig. 13*. Derhalve moet ook in dit opzicht *het ferriet voldoende zacht zijn.*

De cyclus van het voorveld kan men op verschillende wijzen kiezen. Gemakshalve kan men het voorveld alleen laten variëren tussen 0 en een positieve waarde, maar veel grotere variaties in μ_r kan men ver-

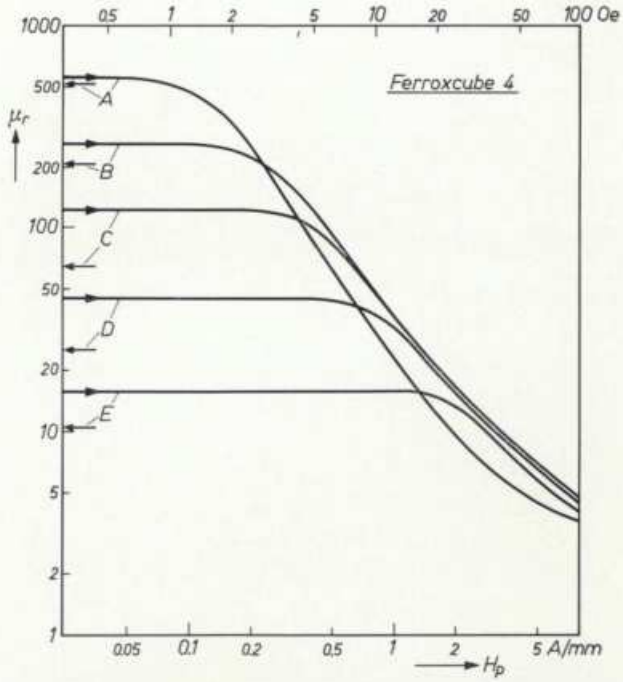


Fig. 13. De incrementele permeabiliteit μ_r als functie van het polariserende veld H_p voor vijf soorten ferroxcube 4. De metingen werden verricht met toenemende H_p, beginnend bij de ontmagnetiseerde toestand. De remanentiewaarden μ_{rem} van μ_r zijn aangegeven met de naar links wijzende pijlen bij de verticale as. In een zacht ferriet (μ_i groot) kan een grote reductie van μ_r verkregen worden met een relatief zwak polariserend veld.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

krijgen als men het veld in de cyclus ook van teken laat omkeren. Dit wordt geïllustreerd met de cycli van *fig. 14a, b* en *c*, die zijn verkregen met een monster van ferroxcube 4C. In fig. 14*a* werd het veld H gevarieerd tussen grote positieve en negatieve waarden, en de piekwaarde van μ_r in de cyclus is iets kleiner dan de beginpermeabiliteit μ_i. In fig. 14*b* werd H gevarieerd tussen 0 en een positieve waarde (na magnetisatie vanaf de ontmagnetiseerde toestand), en de piekwaarde van μ_r is de permeabiliteit bij remanentie, μ_{rem}, die aanzienlijk kleiner is dan de piekwaarde in fig. 14*a*. Ten slotte ziet men in fig. 14*c* dat men een piekpermeabiliteit zeer dicht bij μ_i kan krijgen als men H laat

In het bovenstaande is verondersteld dat het polariserende veld en het hoogfrequente veld *evenwijdig* zijn. Men kan ook andere onderlinge oriëntaties kiezen, maar het polariserende veld is dan minder effectief voor het doen variëren van μ_r. In de CPS zijn de velden niet in alle delen van het ferriet parallel (zie fig. 7*b*); dit is wel het geval in de andere machines.

c) De magnetische verliezen

De verliezen in een magnetisch materiaal in een hoogfrequent veld kunnen *formeel* worden beschreven met de *kwaliteitsfactor* Q of de *verlieshoek* δ van het materiaal. Ook voert men vaak een *complexe permeabi-*

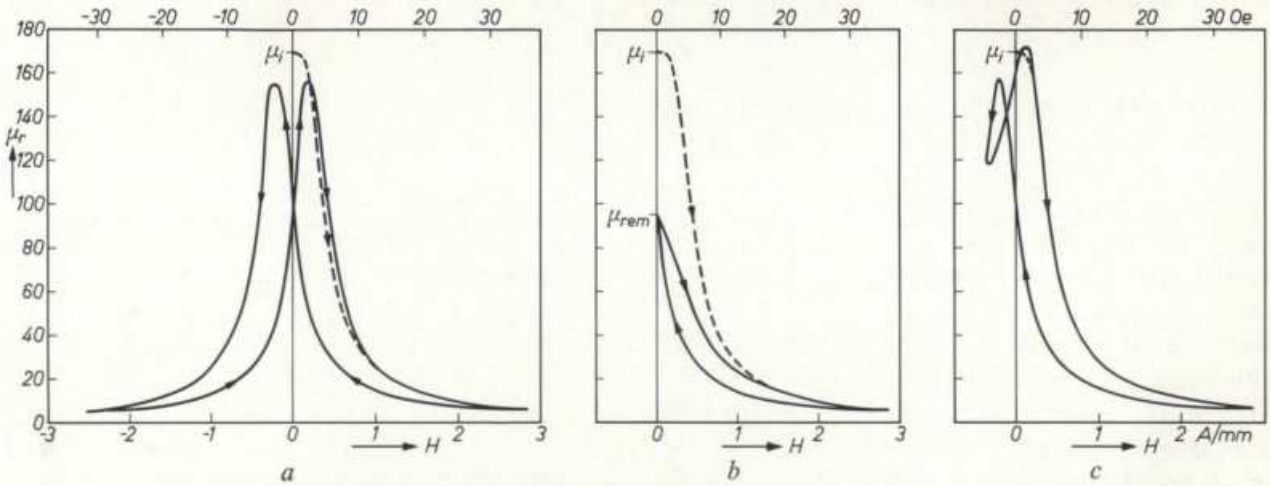


Fig. 14. De variatie van μ_r in verschillende cycli van het polariserende veld. De krommen zijn het resultaat van metingen aan monsters van ferroxcube 4C.
a) H varieert tussen grote positieve en negatieve waarden. De piekwaarde van μ_r ligt iets beneden μ_i.
b) H varieert tussen nul en positieve waarden. De piekwaarde van μ_r in de cyclus is gelijk aan μ_{rem}, die aanzienlijk kleiner is dan μ_i.
c) Varieert H tussen een grote positieve en een kleine negatieve waarde (iets groter dan H_c), dan krijgt men een piekwaarde van μ_r dicht bij μ_i.

variëren tussen een grote positieve en een kleine negatieve waarde (iets kleiner dan de coërcitie H_c). In elk van de besproken machines, uitgezonderd de PPA, wordt het veld gevarieerd tussen 0 en een positieve waarde (zoals in fig. 14*b*, maar met andere soorten ferroxcube 4), en de piekpermeabiliteit is μ_{rem}. In fig. 13 is μ_{rem} voor de vijf soorten ferroxcube 4 aangegeven. In de PPA daarentegen past men inderdaad een cyclus toe van het type van fig. 14*c*, zodat men gebruik maakt van de grootste waarde van μ_r die men kan krijgen. (De keuze van de cyclus werd echter ook door andere overwegingen ingegeven.) De hysteresislus die bij de PPA wordt doorlopen is afgebeeld in *fig. 15*.

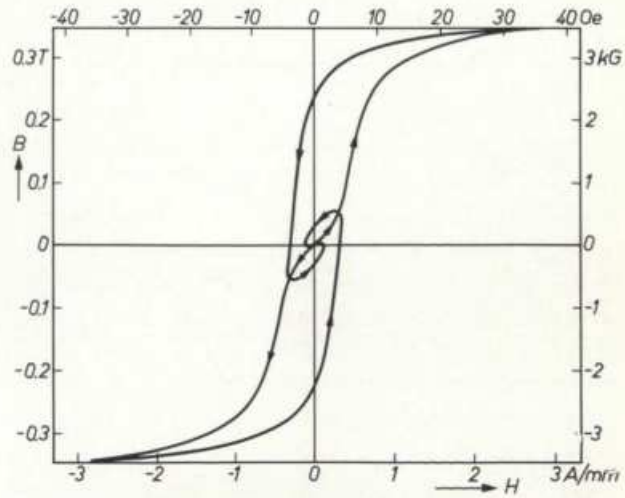


Fig. 15. De *B-H*-kromme die door het ferroxcube 4C in de PPA wordt beschreven. De boven- en de onderhelft corresponderen elk met een volledige synchrotronperiode, zodat de periode van het polariserende veld twee maal zo lang is als de synchrotronperiode. De kleine lusjes bij de oorsprong dienen er (o.a.) toe een hoge piekwaarde van μ_r in de cyclus te realiseren.

[10] J. J. Went en E. W. Gorter, De magnetische en elektrische eigenschappen van ferroxcube-materialen, Philips techn. T. **13**, 213-226, 1951.
[11] „Ferroxcube", uitgegeven door de Philips Industrial Components and Materials Division, blz. 18, 20, 21.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

liteit $\mu_r = \mu' - j\mu''$ in; dan impliceert $\mu'' \neq 0$ een fazevertraging van $B_\sim$ ten opzichte van $H_\sim$, en μ'' is een maat voor de verliezen. De samenhang tussen Q, δ, μ' en μ'' is per definitie:

$$1/Q = \operatorname{tg}\delta = \mu''/\mu'. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (8)$$

Het per volume-eenheid gedissipeerde vermogen is[2]:

$$P = \frac{\omega \hat{B}_\sim \hat{H}_\sim}{2Q} = \tfrac{1}{2}\omega\mu''\mu_0\hat{H}_\sim^2 = \frac{\pi f \hat{B}_\sim^2}{\mu_r\mu_0 Q} \quad . \quad (9)$$

(waarbij verondersteld is dat $\mu''/\mu' = 1/Q \ll 1$ is).

Men moet er rekening mee houden dat Q, δ en μ'' (en in geringere mate μ') in de hier besproken materialen afhankelijk zijn van de amplitudes van magneetveld en inductie: het zijn geen echte „materiaalconstanten".

De verliezen (en de permeabiliteit) van een ferromagnetische substantie kunnen worden bepaald met behulp van een koperen winding om een torus van het materiaal. Stelt men de schakeling voor door een vervangschema met een zelfinductie L en een weerstand R in serie, en verwaarloost men de weerstandsverliezen in de draad, dan vertegenwoordigt R de verliezen in het materiaal. De kwaliteitsfactor Q hangt dan samen met R en L volgens $Q = \omega L/R$.

De *fysische* oorzaken van de hoogfrequentverliezen in ferromagnetische materialen zijn voor vele materialen nog een onderwerp van onderzoek. Van oudsher onderscheidt men *hysteresisverliezen* (verband houdend met b.v. irreversibele wandverschuivingen), *wervelstroomverliezen* (verband houdend met geïnduceerde stromen, die optreden als het materiaal geleidend is) en *restverliezen*. Dit onderscheid kan experimenteel worden gemaakt door het verschil in afhankelijkheid van f en $\hat{B}_\sim$. Als $\hat{B}_\sim$ voldoende klein is, schrijft men[12]:

$$2\pi/\mu_r Q = a\hat{B}_\sim + ef + c, \quad . \quad . \quad . \quad (10)$$

waarin de drie termen de drie soorten verliezen vertegenwoordigen. Dit is een zinvolle beschrijving voor magnetische metalen en ook voor enkele ferrieten bij de lagere frequenties, maar hij verliest zijn waarde als de „constanten" a, e en c blijken af te hangen van f en $\hat{B}_\sim$, zoals het geval is bij ferrieten bij hogere frequenties. In dat geval is het vaak vruchtbaarder de verliezen bij kleine amplitudes van magneetveld en inductie als functie van de frequentie te bestuderen, hetgeen tot goed gedefinieerde Q-waarden leidt. Zoals gezegd, hangt Q bij grotere amplitudes gewoonlijk van de amplitude af. De meeste van de hieronder besproken experimentele resultaten zijn bij kleine amplitudes verkregen.

De verliezen zijn zeer gevoelig voor de wijze van bereiding, wij komen daarop terug als we de technologie bespreken. Hier echter, bij de bespreking van de invloed van de nominale chemische samenstelling, kan opgemerkt worden dat er in het algemeen tussen de soorten A, B . . . E geen grote systematische verschillen zijn in kwaliteitsfactor, *behalve in één opzicht:* de verliesfactor neemt (bij kleine $\hat{B}_\sim$) in alle ferrieten vanaf een zekere frequentie sterk toe, en deze frequentie is des te hoger naarmate het ferriet harder is. In termen van μ'' wordt dit geïllustreerd door *fig. 16*. Door Snoek [13] werd deze toeneming van de verliezen verklaard door een intrinsiek ferromagnetisch resonantieverschijnsel, waarvan de essentie als volgt is. Als er geen sterke demping zou zijn, zou de magnetisatie van elk gebiedje een vrije precessie („Larmor-precessie")

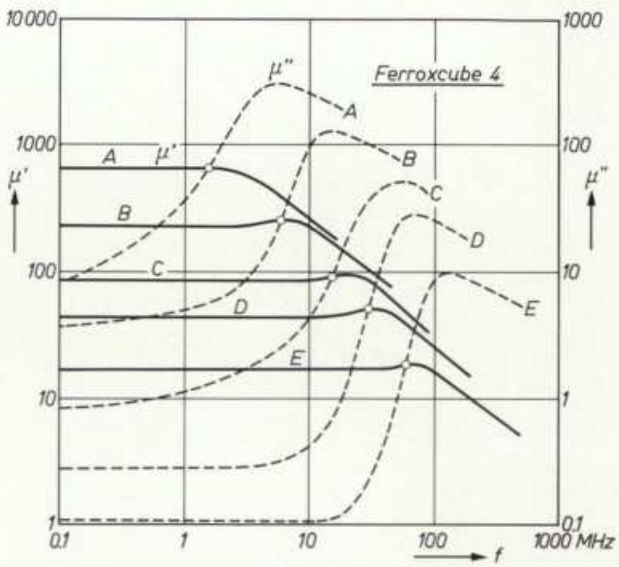


Fig. 16. Het reële gedeelte μ' en het imaginaire gedeelte μ'' van de permeabiliteit als functie van de frequentie voor ferroxcube 4A, B, C, D en E[10]. De piek in μ'' is het gevolg van ferromagnetische resonantie-absorptie. De resonantie begint merkbaar te worden bij die frequentie waarbij $\operatorname{tg}\delta = 0{,}1$ ($Q = \mu'/\mu'' = 10$). Daar de schalen voor μ' en μ'' een factor 10 verschillen, ligt deze frequentie bij het snijpunt van de μ'- en de μ''-kromme (zie ook tabel III).

uitvoeren om de voorkeursrichting, met een hoekfrequentie ω_r die bepaald wordt door het anisotropieveld H_A:

$$\omega_r = \gamma H_A. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (11)$$

De constante γ is de zg. gyromagnetische verhouding. Benadert de hoekfrequentie ω van het h.f. veld nu de waarde ω_r, dan wordt de precessiebeweging geëxciteerd, en de daarmee gepaard gaande absorptie heeft een maximum voor $\omega = \omega_r$. Naarmate het ferriet harder is, is H_A groter, zodat de resonantie-absorptie op zal treden bij een hogere frequentie. Ten einde deze bron van verliezen te vermijden, moet men de werkfrequentie ruim beneden de resonantiefrequentie kiezen. Bij een gegeven werkfrequentie betekent dit dat, vanuit dit gezichtspunt, *het hardste materiaal het gunstigste is.*

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

De kwaliteitsfactor Q neemt altijd *af* als $\hat{B}_\sim$ toeneemt. Dit is van groot belang bij de keuze van een ferriet. Vele materialen met een zeer hoge Q bij kleine h.f. inducties vertonen grote verliezen als de h.f. inductie toeneemt. Daarom wordt, bij de specificaties voor het ferriet, dikwijls de waarde van Q (of $\mu_r Q$ of $\mu_r Q\omega$) *bij een gegeven waarde van* $\hat{B}_\sim$ voorgeschreven, en dit is vaak de specificatie waaraan het moeilijkst kan worden voldaan.

Is het verlies aan kwaliteit ten gevolge van het feit dat $\hat{B}_\sim$ groot is prohibitief, dan kan men de vereiste $\hat{B}_\sim$, althans in principe, reduceren door de doorsnede A van de trilholte te vergroten (waarvoor meer ferriet nodig is), aangezien het in feite de amplitude van de spleetspanning $\hat{V}_\sim$ is die primair een gegeven waarde moet hebben (zie verg. 2).

d) De waarde van $\mu_r Q\omega$

Zoals we reeds hebben gezien, moet de waarde van $\mu_r Q\omega$ groot zijn. Deze waarde is als functie van de frequentie voor gewone monsters van ferroxcube 4A, B, C, D en E, in de ongepolariseerde toestand en voor kleine $B_\sim$, uitgezet in *fig. 17*. De toeneming bij de lagere frequenties wordt veroorzaakt door de factor ω (in dit gebied zijn μ_r en Q ruwweg constant); het vlakker worden en de afneming bij de hogere frequenties is het gevolg van de nadering van ferromagnetische resonantie. Ter vergelijking geeft fig. 17 eveneens $\mu_r Q\omega$-krommen van ferroxcube 4H, een soort die hieronder nog ter sprake komt, en van enkele materialen die in het meer recente verleden zijn ontwikkeld (4L2 en 4C4).

Als een ferrietmonster wordt gepolariseerd, verschuift de $\mu_r Q\omega$-kromme naar beneden en naar rechts. Dit ziet men in *fig. 18* voor ferroxcube 4H. Een verschuiving naar beneden kan men verwachten vanwege de daling van μ. De verschuiving naar rechts kan verklaard worden door de toeneming van het *totale* effectieve lokale veld H_{eff}, die een toeneming van de ferromagnetische resonantiefrequentie $\omega_r = \gamma H_{\text{eff}}$ impliceert.

De krommen van fig. 17 en 18 werden verkregen met kleine waarden van $\hat{B}_\sim$. Bij gebruik in de versnellers zijn de waarden van $\hat{B}_\sim$ echter niet zeer klein, zodat $\mu_r Q\omega$ kleiner is dan uit de figuren zou volgen (zie hierboven). De verschuiving van $\mu_r Q\omega$ naar beneden is op het ogenblik van injectie van de protonen in de versneller (ferriet ongepolariseerd, kromme links boven in fig. 18) groter dan bij het einde van de cyclus (ferriet gepolariseerd, kromme rechts onder in fig. 18), wegens het verloop van $\hat{B}_\sim$ tijdens de cyclus. Het verschil in piekwaarden van $\mu_r Q\omega$ van de twee krommen in fig. 18 wordt derhalve min of meer gecompenseerd. Experimenteel is gevonden dat, onder de voorwaarden (6) en (7), de grootheid $\mu_r Q\omega$ inderdaad ongeveer constant blijft [14].

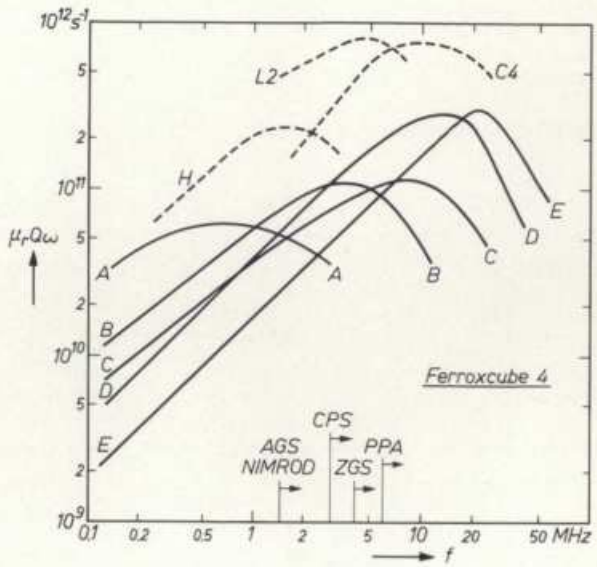


Fig. 17. $\mu_r Q\omega$ als functie van de frequentie f voor de vijf soorten ferroxcube 4A, B, C, D en E (ongepolariseerd, en bij kleine $\hat{B}_\sim$), voor ferroxcube 4H, dat ontwikkeld werd voor de AGS en de CPS, en voor enkele later ontwikkelde materialen, 4L2 en 4C4. De laagste frequentie van de versnellingsspanning in elk van de machines is eveneens aangegeven (zie tabel V; voor de PPA is de frequentie aangegeven waar de trilholte de versnelling overneemt).

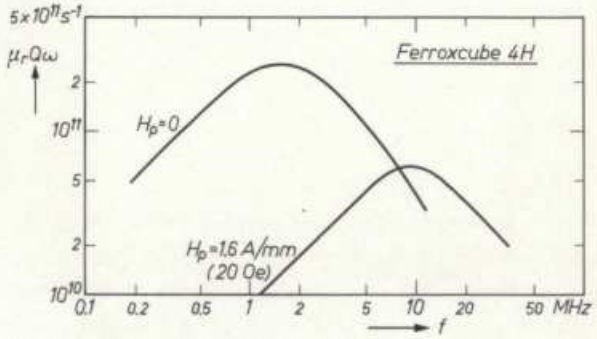


Fig. 18. $\mu_r Q\omega$ als functie van de frequentie f voor ferroxcube 4H (bij kleine $\hat{B}_\sim$), in de ongepolariseerde toestand en in een polariserend veld van 1,6 A/mm (20 Oe).

De keuze van een bepaalde soort ferriet voor een synchrotron

We passen nu de gegeven beschouwingen toe door na te gaan in hoeverre de ferrietsoorten die in feite werden gekozen aangepast zijn aan de eisen voor de verschillende synchrotrons. De samenstelling van deze soorten, samen met die van de destijds in de handel verkrijgbare soorten 4A-4E, is aangegeven in *tabel IV*.

[12] V. E. Legg, Magnetic measurements at low flux densities using the alternating current bridge, Bell Syst. tech. J. **15**, 39-62, 1936.

[13] J. L. Snoek, Dispersion and absorption in magnetic ferrites at frequencies above one Mc/s, Physica **14**, 207-217, 1948. Zie ook: H. G. Beljers en J. L. Snoek, Gyromagnetische verschijnselen bij ferrieten, Philips techn. T. **11**, 317-325, 1949.

[14] Zie b.v. G. Rakowsky, RF accelerating cavities for AGS conversion, IEEE Trans. **NS-14**, no. 3, 315-319, 1967.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Tabel IV. Chemische samenstelling van de destijds normaal verkrijgbare en van de voor de synchrotrons ontwikkelde soorten ferroxcube 4.

Ferroxcube	4K1	4A	4H	4L1	4B	4C	4D	4E
Hoofdbestanddelen (mol.%)								
NiO	15	18	21,5	23,9	25	32	40	50
ZnO	32,5	32	28,5	25,9	25	18	10	0
Fe_2O_3	49	50	50	50	50	50	50	50
Toevoeging (mol.%)								
MnO	1							
Mn_2O_3				0,24				
CuO	2,5							
Toegepast in	Nimrod		AGS CPS	ZGS		PPA		

Tabel V. Het frequentiegebied van de synchrotrons [3] en de vereiste variatie van μ_r.

		AGS	CPS	ZGS	Nimrod	PPA	
						loop-buis	tril-holte
frequentie bij injectie f_i	in MHz	1,4	2,9	4,4	1,4	2,7	6
eindfrequentie f_t	in MHz	4,45	9,5	14	8,0	6,5	30
frequentieverhouding f_t/f_i		3,2	3,2	3,2	5,6		5
$(f_t/f_i)^2$		10,2	10,2	10,2	31		25
gespecificeerde μ_{max}/μ_{min}		10	25	12	45		
gespecif. bovengrens voor $H_{p\,max}$	in A/mm (in Oe)	1,2 (15)	2,0 (25)	2,8 (35)	1,5 (19)		

Tabel V geeft het frequentiegebied en de frequentiezwaai van elk synchrotron. Met verg. (6) kan men uit de frequentiezwaai een specificatie voor de minimale variatie van de permeabiliteit afleiden. De voor μ_{max}/μ_{min} geëiste waarde is dikwijls groter dan de $(f_t/f_i)^2$-waarde van de machine, ter compensatie van de onvolledige vulling van de trilholte met ferriet en van verschillen tussen de condities waaronder het materiaal wordt getest en waaronder het wordt gebruikt, om speling te laten in de mogelijkheden van de machine, enz. De grootste variatie in μ_r werd geëist voor Nimrod, de machine met de grootste frequentiezwaai met ferrietafstemming in één stap.

Duizenden ampères kunnen er nodig zijn om het ferriet te polariseren (tabel I), en meestal wordt er een bovengrens aangegeven voor het vereiste veld (6de rij van tabel V). In *fig. 19* zijn deze specificaties gecombineerd met de (μ_r,H_p)-krommen van fig. 13, waarbij rekening is gehouden met het feit dat de reductie van μ_r gewoonlijk vanaf μ_{rem} moet worden verkregen.

Het maximum van $\mu_r Q\omega$ van het ongepolariseerde ferriet moet bij voorkeur liggen bij de laagste werkfrequentie van de machine. Vergelijkt men nu tabel V met fig. 17, dan ziet men dat voor de AGS en de CPS een samenstelling moest worden gekozen die ligt tussen A en B. In fig. 19 ziet men dat een dergelijke samenstelling de vereiste μ-variatie vertoont in een polariserend veld dat de gespecificeerde maximumwaarde niet overschrijdt. Voor de AGS en de CPS is inderdaad een ferriet tussen A en B ontwikkeld, nl. ferroxcube 4H (zie tabel IV). Uit fig. 18 blijkt dat dit ferriet bijzonder goed is aangepast bij de CPS, daar ook in de gepolariseerde toestand het maximum van $\mu_r Q\omega$ dichtbij de werkfrequentie voor die situatie (de eindfrequentie van 10 MHz) optreedt.

Voor Nimrod wees de laagste frequentie eveneens in de richting van een ferriet tussen A en B. De μ-variatie was echter niet groot genoeg (fig. 19): men ziet dat men

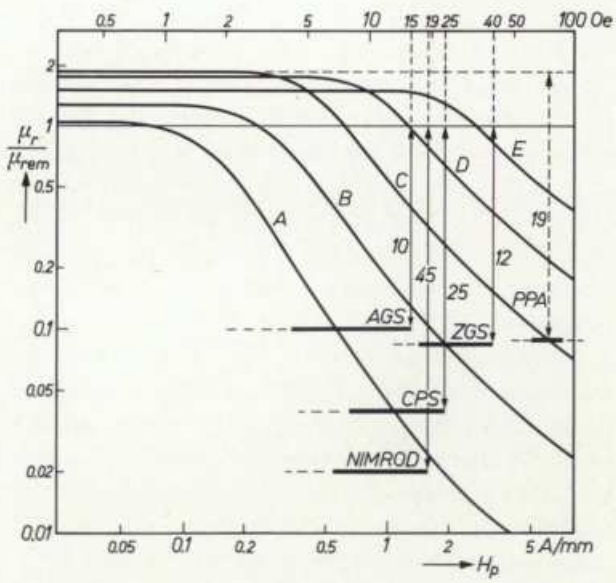


Fig. 19. μ_r/μ_{rem} als functie van het polariserende veld H_p voor ferroxcube 4A, B, C, D en E volgens fig. 13, gecombineerd met de gespecificeerde μ-variatie (aangegeven met de dubbele pijl) en de bovengrens die gesteld is aan het daarvoor vereiste polariserende veld (einde van de dikke lijn) voor elk synchrotron, volgens tabel V. De μ-variatie moet worden verkregen vanaf μ_{rem} (d.w.z. μ_r/μ_{rem} moet beginnen bij 1), behalve bij de PPA (zie tekst). Een ferrietsoort voldoet aan de specificatie als de (μ_r,H_p)-kromme ervan de dikke lijn snijdt.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

een soort moest kiezen die „vóór A" ligt. Het ferriet dat voor Nimrod is ontwikkeld (4K1) kan inderdaad als zodanig worden beschouwd (tabel IV). (De toevoeging van andere chemische componenten komt hieronder ter sprake.)

Voor de ZGS wees de laagste frequentie in de richting van ferroxcube 4B (fig. 17), en dit heeft eveneens een voldoend grote μ-variatie (fig. 19). Het ferriet voor de ZGS, 4L1, is inderdaad ongeveer van de samenstelling van 4B (tabel IV).

Bij de PPA moest de trilholte het tweede gedeelte (6-30 MHz) van het frequentiegebied van de machine bestrijken. De laagste frequentie van dit gedeelte, 6 MHz, wees in de richting van ferroxcube 4C. Aangezien er geen maximumwaarde voor H_p werd voorgeschreven, kon men deze soort gebruiken, wat dan ook is gedaan. Om echter voor de μ-variatie niet in een al te grote H_p te vervallen, is hier een speciale, enigszins gecompliceerde polarisatiecyclus toegepast, zoals hierboven is vermeld (fig. 15).

Technologie

De relevante eigenschappen van het materiaal: de permeabiliteit en de kwaliteitsfactor, worden niet alleen door de chemische samenstelling bepaald, maar eveneens, en in hoge mate, door de microstructuur van het materiaal. Als het materiaal bij voorbeeld poriën of niet-magnetische insluitsels heeft, wordt de permeabiliteit op twee wijzen nadelig beïnvloed: a) Bij de poriën treedt interne ontmagnetisatie op, zodat het veld in het eigenlijke materiaal zwakker is dan het uitwendige veld. b) De wanden van de magnetische gebiedjes hebben de neiging om vast te gaan zitten aan de insluitsels, zodat de bijdrage van de wandverschuiving tot de permeabiliteit afneemt. Als de wandverschuiving geheel geëlimineerd zou worden, zou de permeabiliteit alleen het gevolg zijn van draaiing van de magnetisaties der gebiedjes.

De microstructuur van het materiaal is in hoofdzaak een kwestie van de bereiding van het materiaal. De ferrieten zijn keramische produkten, en bij het beheersen van de microstructuur van het sinterprodukt speelt de ervaring een belangrijke rol. In het algemeen gesproken, is homogeniteit, zowel in chemische samenstelling als in microstructuur, uitermate belangrijk. Ook blijkt de kwaliteit zeer gevoelig te zijn voor afwijkingen van de stoechiometrie [15]. Naarmate er meer zorg besteed wordt aan factoren van deze aard, is het materiaal beter. Dit ziet men b.v. door vergelijking van de $\mu_r Q\omega$-waarden van ferroxcube 4H, dat speciaal ontwikkeld werd voor de AGS en de CPS, met die van de gewone soorten ferroxcube 4 (fig. 17).

De grote afmetingen van de ferrietblokken en -ringen (zie fig. 20) stelden de ferrietfabrikant voor ongewone problemen. De ringen waaruit de kernen voor de PPA zijn samengesteld zijn de grootste stukken ferriet die ooit werden gemaakt. Het persen van een dergelijke ring, dat vóór het stoken gebeurt, vereist een hydraulische pers van 300 ton. Het sinteren van dergelijke grote stukken is bijzonder moeilijk; de temperatuur moet over het hele volume van de oven zeer gelijkmatig zijn en de sintersnelheid zodanig dat de stukken zeer gelijkmatig krimpen, om barsten te voorkomen. Immers, het sinteren kan gepaard gaan met een afneming in de lineaire afmetingen van wel 25%. Voor sommige stukken was een stookperiode nodig van 5 dagen.

Verschillende details van de technologie zijn erop gericht de verliezen die het gevolg zijn van de aanwezigheid van ferro-ionen te reduceren. Bevat het kristalrooster een aanzienlijke concentratie van deze ionen naast de ferri-ionen, dan blijken de elektronen vrij gemakkelijk tussen deze twee soorten ionen heen en weer te gaan. Deze beweeglijkheid van ladingen geeft aanleiding tot extra-verliezen. Bij grote concentraties is deze beweeglijkheid equivalent met zowel een lage waarde van ϱ als met een hoge waarde van ε_r. Dit is de reden voor de betere geschiktheid (hoge ϱ, kleine ε) van ferroxcube 4 vergeleken met 3: in ferroxcube 3 behoren de ferro-ionen nominaal tot de samenstelling, in 4 is dit niet het geval.

Het sinteren vindt plaats bij een hoge temperatuur (ongeveer 1200 °C). Een hoge sintertemperatuur leidt tot een dicht produkt, dus tot een hoge waarde van μ_r. Bij deze temperaturen is er echter een neiging om zuurstof af te staan, hetgeen leidt tot de vorming van ferro-ionen, en derhalve tot grotere verliezen. Om het verlies van zuurstof tegen te gaan, wordt het stoken uitgevoerd in een zuurstofatmosfeer. De zuurstofdruk die nodig zou zijn om de reactie volledig te vermijden is echter zeer hoog en daarom past men een lagere druk toe en neemt men er genoegen mee dat voornamelijk gedurende het afkoelen een reoxidatie plaatsvindt. Als nu de sintertemperatuur hoog gekozen wordt ten einde een grote μ_r te verkrijgen, kan het materiaal zo dicht worden dat de zuurstof niet voldoende kan indringen, hetgeen resulteert in onvolledige reoxidatie en daarmede in een verlies van kwaliteit.

Er zijn nog andere middelen om de vorming van ferro-ionen te voorkomen. In de eerste plaats kan de stooktemperatuur die een voldoende dicht produkt geeft worden verlaagd door toevoeging van kleine hoeveelheden van een „verdichtingsmiddel"; koperoxide

[15] F. G. Brockman en K. E. Matteson, New technique for the precise control of the stoichiometry of nickel zinc ferrite and the resulting high quality product, voorgedragen op de 71e Annual Meeting van de American Ceramic Society. Voor een samenvatting, zie Amer. Ceramic Soc. Bull. **48**, 430, 1969 (no. 4).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

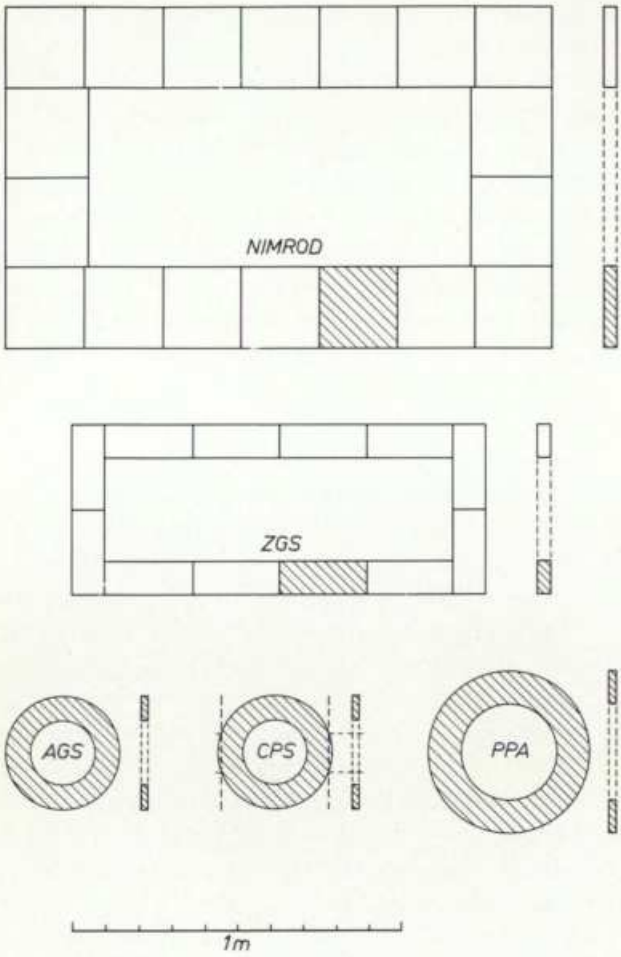


Fig. 20. De ferrietramen en -ringen die voor de vijf synchrotrons zijn gemaakt, op schaal. Voor de ZGS en voor Nimrod werden blokken vervaardigd, waaruit de ramen door lijmen (ZGS) of klemmen (Nimrod) werden samengesteld. Op de kernen voor de CPS, verkregen door het op elkaar lijmen van de ringen, werden vlakke zijkanten geslepen voor een nauwkeurige passing in de polarisatiemagneet.

Fig. 21. Een ferrietkern voor de CPS.

Tabel VI. Verdeling van het ferroxcube over de trilholtes

	aantal trilholtes	per trilholte	hoeveelheid ferriet per trilholte in kg	totale hoeveelheid ferriet in kg
AGS	12	4 kernen = 80 ringen	500	6000
CPS	15	2 kernen = 90 ringen	560	8400
ZGS	1	30 ramen	1760	1760
Nimrod	1	28 ramen	6000	6000
PPA	4	44 ringen [*]	750	3000

[*] 40 ringen voor de eigenlijke trilholte, 4 voor de loopbuisspoel.

(gebruikt in 4K1, zie tabel IV) blijkt als zodanig te werken. In de tweede plaats kan men kleine hoeveelheden mangaanoxide toevoegen [16]. IJzer wordt gemakkelijker geoxideerd dan mangaan, zodat Fe^{2+}-ionen in de aanwezigheid van Mn^{3+} gereoxideerd zullen worden door de reactie: $Fe^{2+} + Mn^{3+} \rightarrow Mn^{2+} + Fe^{3+}$. Deze methode werd toegepast bij de bereiding van 4K1 en 4L1 (tabel IV).

De kernen

In *fig. 20* zijn de blokken, ramen en ringen die voor de vijf synchrotrons werden gemaakt op schaal getekend. De totale hoeveelheid trilholteferriet per synchrotron, en de wijze waarop deze hoeveelheid over de trilholtes verdeeld is, zijn vermeld in *tabel VI*.

De kernen voor de CPS werden verkregen door de ringen direct aan elkaar te lijmen. *Fig. 21* toont een volledige kern. Na het lijmen werden vlakke kanten aan de kern geslepen, zodanig dat de kern nauwkeurig in de polarisatiemagneet past (vgl. fig. 7*b*). Bij de AGS werden koperen koelplaten tussen de ringen gemonteerd (*fig. 22*). In de PPA werden de ringen afzonderlijk in

[16] L. G. Van Uitert, Proc. IRE **44**, 1294-1303, 1956.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

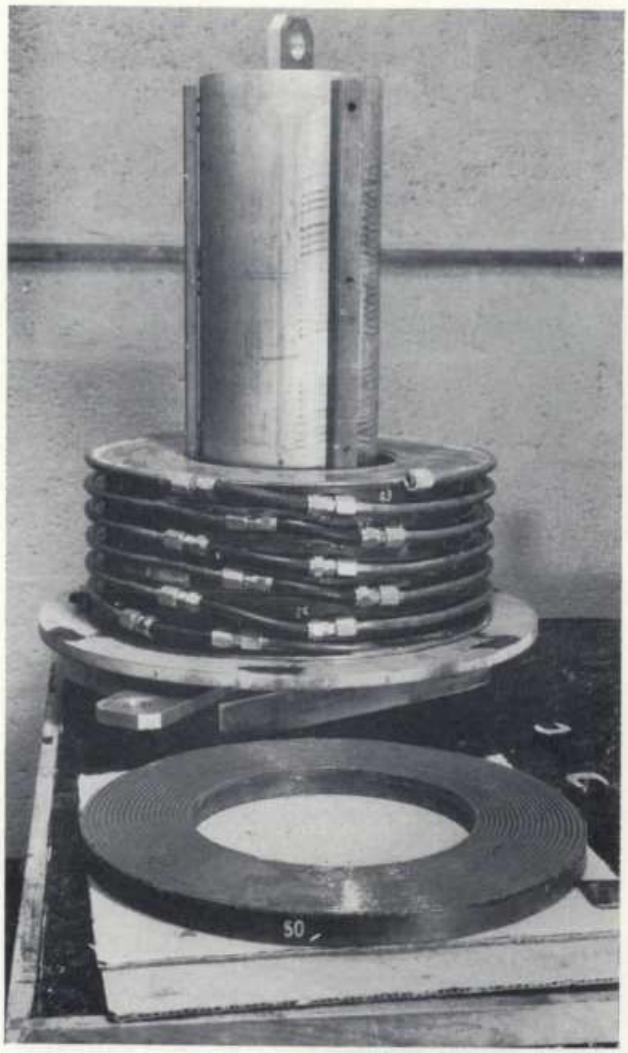


Foto Brookhaven National Laboratory

Fig. 22. Een ferrietkern voor de AGS in aanbouw. Tussen de ferrietringen worden met water gekoelde koperen platen aangebracht.

de trilholtes gemonteerd, evenals de ramen in de ZGS en Nimrod (zie de fig. 8 en 10). De ramen voor de ZGS werden samengesteld door de grote blokken aan elkaar te lijmen. (De ramen voor het Cosmotron werden indertijd op dezelfde wijze gemaakt[1].) Voor Nimrod werd deze werkwijze aanvankelijk ook toegepast (*fig. 23*), maar omdat het lijmen hier enkele malen tot een teleurstellend resultaat had geleid, werden de blokken later ook wel ter plaatse vastgeklemd in plaats van gelijmd.

De blokken, ringen, ramen en kernen moesten met zeer geringe toleranties voor de afmetingen worden vervaardigd. Hiertoe werden de oppervlakken bewerkt met diamantgereedschap. Met deze nauwkeurigheid in de afmetingen beoogt men de spleten in de magnetische kring, zowel van het voorveld als van het hoogfrequente veld, zo klein mogelijk te maken; immers, elke spleet in de magnetische kring verkleint de effectieve permeabiliteit van het geheel.

Het h.f.-ingangsvermogen van een synchrotron is vele kilowatts (zie tabel XII op blz. 376 in het volgende artikel[3]), en een aanzienlijk deel van dit vermogen wordt gedissipeerd in het ferriet; de kernen moeten derhalve worden gekoeld. Daar de ferrieten slechte warmtegeleiders zijn, moeten alle onderdelen in nauw contact worden gebracht met het koelwater of de koelolie. In Nimrod en in de PPA is er ruimte tussen de opeenvolgende ferrietramen en -ringen (zie fig. 8), en elk raam resp. elke ring is ondergedompeld in de koelolie. In de AGS vindt de koeling plaats door middel van de reeds genoemde koperen platen (fig. 22). In de ZGS stroomt het koelwater door platte, tussen de ramen gemonteerde, koperen kanalen (zie fig. 10).

Fig. 23. Een Nimrod-raam, dat op vlakheid wordt getest.

In de CPS zijn koelbuizen aangebracht op een koperen omhulsel van de kern (dat tevens als trilholtewand fungeert; *fig. 24*). De genoemde nauwkeurigheid in de afmetingen is in sommige gevallen tevens van belang voor het warmtecontact tussen de kern en de koelelementen.

Met de warmteontwikkeling en het koelprobleem zijn nog enkele eisen verbonden waaraan het ferriet moet voldoen. Om „hete plekken" in het inwendige te voorkomen, moeten de plakken voldoende dun zijn en de warmtegeleiding voldoende groot (b.v. > 3 W/m °C).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

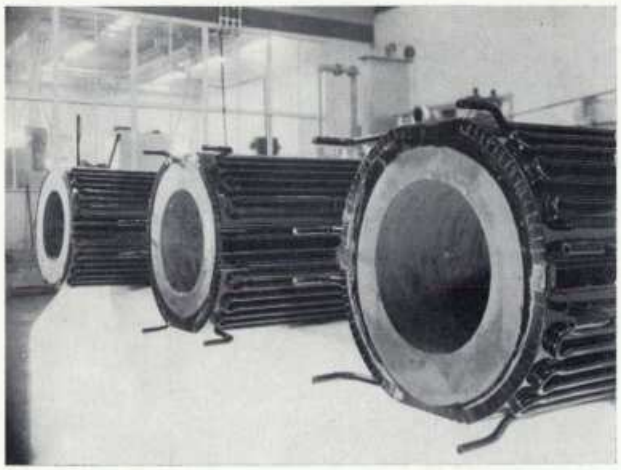


Fig. 24. CPS-ferrietkernen met buizen voor de waterkoeling. De buizen zijn gemonteerd op een koperen omhulling, die tevens als trilholtewand fungeert.

De temperatuurverschillen die in het materiaal ontstaan (b.v. 60 °C tussen de binnen- en de buitenkant van de CPS-kern) beïnvloeden μ en Q; daarom wordt de temperatuurcoëfficiënt van deze grootheden soms gespecificeerd (b.v. $< 0{,}5\%$ per °C). Voorts moet het materiaal thermische (en andere) spanningen kunnen verdragen; 2000 N/cm² is een representatieve waarde voor de vereiste treksterkte. Het voldoen aan dergelijke specificaties is meer een kwestie van technologie dan van chemische samenstelling.

Om de grote stukken materiaal bij de vereiste frequentie en de vereiste hoge waarde van de h.f. inductie op hun magnetische eigenschappen te testen, heeft men een hoogfrequentinstallatie voor groot vermogen nodig. In de beginperiode van keuze en ontwikkeling van de materialen werd in het Philips Natuurkundig Laboratorium te Eindhoven een impulsmethode ontwikkeld, ten einde de noodzaak van een dergelijke grote installatie voorlopig te omzeilen. In deze methode wordt het proefstuk aan korte impulsen van hoogfrequentvermogen onderworpen [17], zodat het ogenblikkelijke vermogen, bij een klein gemiddeld vermogen, de vereiste waarde kan bereiken. Een LC-kring met een zelfinductie waarvan het proefstuk de kern vormt, en die afgestemd is op de vereiste frequentie, wordt door de impuls geëxciteerd, en de hierop volgende vrije oscillaties van de kring worden op een oscillograaf zichtbaar gemaakt. Uit de frequentie en de capaciteit C van de kring vindt men L, en derhalve de permeabiliteit, terwijl de kwaliteitsfactor wordt afgeleid uit de demping van de oscillaties. In de fabriek werd later echter een speciale proefinstallatie voor groot vermogen gebouwd waarmee elke ring, elk blok (vóór het aaneenvoegen tot ramen) en elk raam, bij de gespecificeerde frequentie en inductie, en in de gepolariseerde toestand, vóór de definitieve levering kon worden getest.

[17] H. van der Heide, Ferroxcube in proton accelerators, Philips Matronics no. 14, 256-264, 1958.

Samenvatting. Voor de versnellingsstations van vijf protonensynchrotrons, die elders in ditzelfde nummer nader worden besproken: de AGS te Brookhaven, de CPS te Genève, de ZGS te Argonne, Nimrod te Chilton en de PPA te Princeton, heeft Philips de kernen van ferroxcube geleverd. Het gaat daarbij om grote stukken, b.v. ringen van 50 cm diameter of (tot ramen samen te voegen) blokken van 25 cm lengte, en om grote hoeveelheden: van 1760 kg bij de ZGS tot 8400 kg bij de CPS. In een versnellingsstation, opgevat als een eenwindingsspoel over de uiteinden waarvan de versnellingsspanning verschijnt, fungeert het ferroxcube niet alleen als kernmateriaal, maar vooral als hulpmiddel bij het afstemmen van de spoel op de snel veranderende omloopfrequentie van de versnelde protonen. Dit afstemmen geschiedt door de incrementele permeabiliteit μ_r van het ferroxcube te regelen door polarisatie met een voorveld. Behalve een sterke beïnvloedbaarheid van μ_r is een grote waarde van $\mu_r Q\omega$ gunstig voor deze functies. Van de destijds veel gebruikte ferrieten zijn de nikkel-zink-ferrieten (een reeks verbindingen met continu variërende samenstelling, waarvan er vijf, de ferroxcubes 4A, 4B, 4C, 4D en 4E, in de handel waren gebracht) voor de toepassing geschikt gebleken. Hiervan zou de zachtste soort (A) het meest geschikt zijn met het oog op permeabiliteit en mogelijke variatie van μ_r, de hardste (E) met het oog op het vermijden van ferromagnetische resonantieverliezen. Het gunstigste compromis is voor elk synchrotron anders: tussen A en B voor de AGS en de CPS, nog zachter dan A voor Nimrod, omstreeks B voor de ZGS, en C voor de PPA. Bij de bereiding van het materiaal — een keramisch produkt — moet men vooral streven naar homogeniteit in microstructuur en samenstelling, en het mengen, persen en sinteren moet, vooral wegens de grote afmetingen, zeer zorgvuldig geschieden. Ter vermijding van extra-verliezen moet men de vorming van ferro-ionen tegengaan (sinteren in zuurstofatmosfeer, in sommige gevallen toevoeging van mangaanoxide of koperoxide).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Vijf protonensynchrotrons

R. Gouiran

Inleiding

In het voorgaande artikel [1] zijn vijf van de grootste deeltjesversnellers ter wereld besproken met het oog op de grote hoeveelheden ferriet die erin zijn gebruikt. Het uitzonderlijke karakter van deze machines, zowel uit fysisch als uit technisch oogpunt, en de ongewone gelegenheid, de verschillende machines eens samenvattend te beschouwen, zijn aanleiding om hier de beschrijving van de machines nader uit te werken. Doordat dan hier en daar de gelegenheid zich voordoet vergelijkingen te trekken, wordt misschien tevens een bijdrage geleverd tot begrip van de filosofie die aan de keuze van bepaalde parameterwaarden bij het ontwerp van deze machines ten grondslag ligt.

Het betreft de volgende machines:

1) Het „Alternating Gradient Synchrotron" te Brookhaven (U.S.A.).
2) Het „CERN Proton Synchrotron" te Genève.
3) Het „Zero Gradient Synchrotron" te Argonne (U.S.A.).
4) De „Nimrod" te Chilton (Engeland).
5) De „Princeton-Pennsylvania Accelerator" te Princeton (U.S.A.).

Zij worden hier (evenals in [1]) aangeduid met de gebruikelijke afkortingen AGS, CPS, ZGS, Nimrod en PPA.

Deze vijf machines zijn alle protonensynchrotrons en derhalve gebouwd volgens hetzelfde basispatroon. Dit patroon, waarin een ringvormige vacuümkamer, een kring van afbuigmagneten en een aantal versnellingsstations tussen de magneten de hoofdbestanddelen vormen, werd reeds geschetst in het voorgaande artikel. In uiterlijk en in detail is er echter een grote verscheidenheid. Het verschil in afmetingen van de ringen b.v. wordt geïllustreerd door de *figuren 1, 2* en *3*. Daarin ziet men: de kleinste machine, de PPA (fig. 2); de ring van beton waarin de grootste machine, de AGS, werd ondergebracht (fig. 3); en de ZGS, die in afmetingen een tussenpositie inneemt (fig. 1). Een groot verschil

Dr. R. Gouiran, medewerker van de Proton Synchrotron Machine Division van CERN, Genève.

[1] F. G. Brockman, H. van der Heide en M. W. Louwerse, Ferroxcube voor protonensynchrotrons, het voorgaande artikel in dit nummer.

Foto Argonne National Laboratory

Fig. 1. Overzicht van het gebouwencomplex van het Zero Gradient Synchrotron te Argonne. De eigenlijke versneller is omgeven door een aarden wal.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

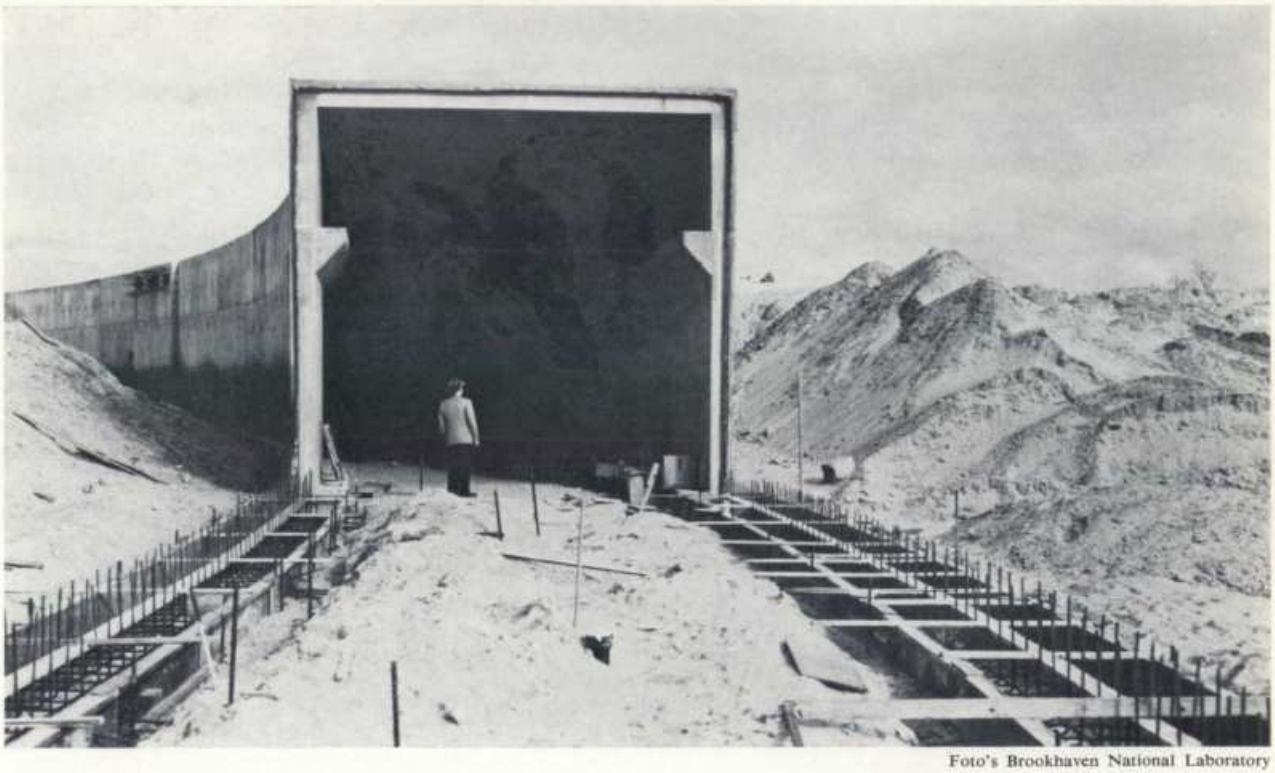
www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Foto's Princeton-Penn Accelerator

Fig. 2. De Princeton-Pennsylvania Accelerator te Princeton. Boven: overzicht van het gebouwencomplex. Bovenop de cirkelvormige versnellerruimte is een batterij condensatoren opgesteld die een resonantiesysteem vormt met de synchrotronmagneten. Onder: de ring van magneten tijdens de bouw van de versneller.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



Foto's Brookhaven National Laboratory

Fig. 3. Twee foto's van de ring van beton waarin het Alternating Gradient Synchrotron te Brookhaven werd ondergebracht.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Foto CERN

Fig. 4. Enkele magneeteenheden in de ring van het CERN-protonensynchrotron te Genève, kort na de opstelling in 1959.

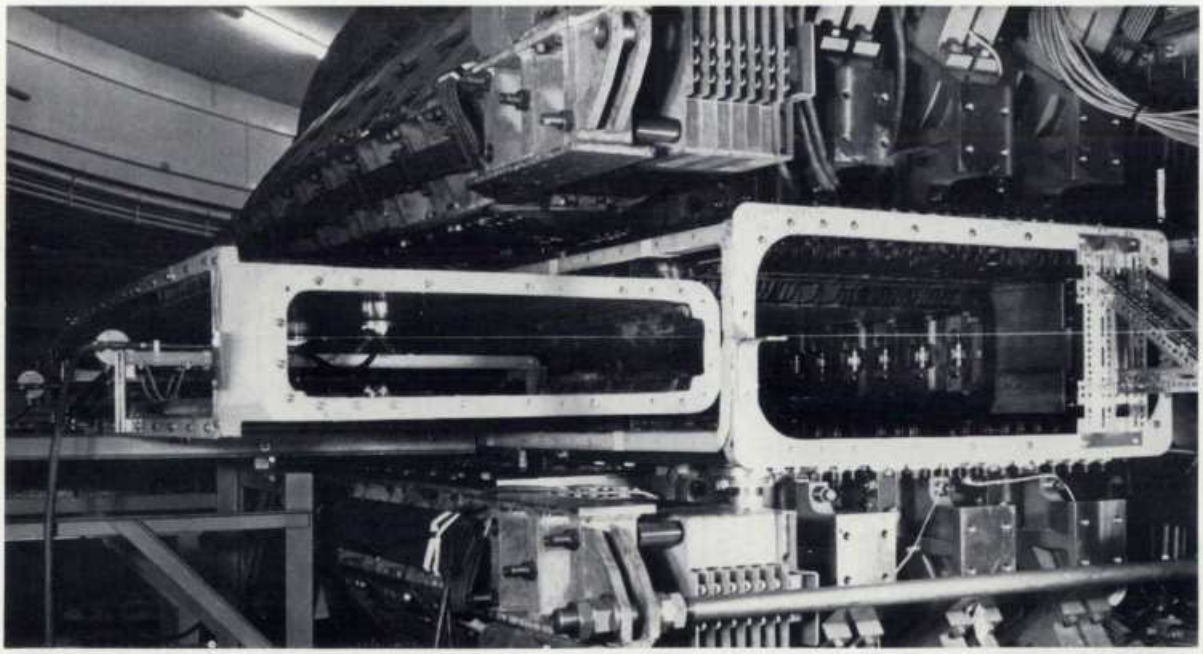


Foto Rutherford High Energy Laboratory

Fig. 5. Sectie van de dubbelwandige vacuümkamer van Nimrod in aanbouw, in de luchtspleet van de magneet. Links de binnenkamer, die nog in de buitenkamer geschoven moet worden.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

in opzet ziet men b.v. ook als men de magneeteenheden van de CPS en Nimrod vergelijkt: bij de eerste een rij van vele, betrekkelijk kleine, magneeteenheden (*fig. 4*) bestemd voor een nauwe vacuümkamer; in het andere geval een enorme vacuümkamer (*fig. 5*) geplaatst in een zware magneet. In *fig. 6* zijn de dwarsdoorsneden van de vacuümkamers van de vijf synchrotrons op schaal getekend. *Fig. 7* geeft de rangschikking van de magneten voor alle machines te zamen op schaal. Ten slotte zijn in *tabel I* enkele karakteristieke gegevens verzameld.

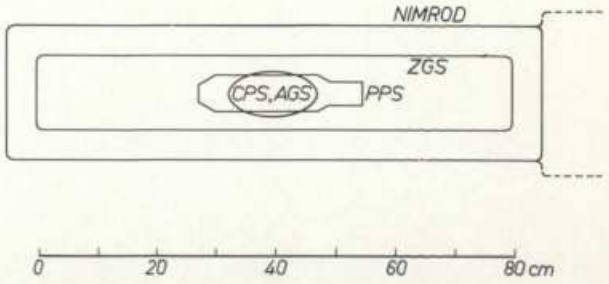


Fig. 6. De dwarsdoorsneden van de vacuümkamers van de vijf synchrotrons, op schaal getekend.

Tabel I. Algemene gegevens.

		AGS	CPS	ZGS	Nimrod	PPA
eindenergie van de protonen	in GeV	33	28	12,7	7	3
cyclusperiode	in s	2,5	2,5	2,3	2,6	0,054
gemiddelde straal van de ring	in m	128,5	100	27,4	23,6	12,51
gewicht van het magneetstaal	in ton	4000	3000	4700	7000	400
datum in-werking-stelling		juli 1960	nov. 1959	sept. 1963	aug. 1963	april 1963

Deze verschillen kunnen uiteindelijk worden teruggebracht tot verschillen in de eindenergie en in de intensiteit van de protonenbundel waarvoor elke machine is ontworpen. De eindenergie, te zamen met het maximale afbuigveld — dat voor een conventionele afbuig-elektromagneet voornamelijk begrensd wordt door verzadiging van het magneetstaal en dan met een inductie van hoogstens omstreeks 2,0 tesla (20 kilogauss) correspondeert —, bepaalt de lengte van de ring (exclusief de rechte stukken). De intensiteit wordt hoofdzakelijk bepaald door de „helderheid" van de bron en de „acceptantie" van de versneller — begrippen die we hieronder nader zullen toelichten; aangezien de acceptantie afhangt van de doorsnede van de vacuümkamer, houdt een minimumeis betreffende de intensiteit een minimumeis betreffende de dwarsdoorsnede van het magneetjuk in. Uit de lengte van de ring en de dwarsdoorsnede van de magneet kan men een eerste schatting maken van de totale kosten, die nl. voor een aanzienlijk gedeelte worden bepaald door de vereiste hoeveelheid staal.

Alvorens nu de vijf synchrotrons in detail te bespreken (blz. 364 e.v.), moeten we uitvoeriger op de algemene principes van een protonensynchrotron ingaan. Daarbij zal alleen over het produceren van de protonenbundel zelf worden gesproken. Natuurlijk dient men zich te realiseren dat een versneller zijn waarde ontleent aan de experimenten die men ermee kan doen. Aan het einde van de versnellingscyclus worden de deeltjes volgens de een of andere methode — b.v. door de bundel te extraheren of een trefplaatje in de bundel te plaatsen — voor deze experimenten gebruikt. Op deze methodes gaan wij verder niet in; niettemin vormen zij een essentieel element in het geheel.

Enkele relativistische formules

Aangezien de deeltjes na versnelling (en vaak ook reeds bij injectie in de versnellingsring) een snelheid hebben die de lichtsnelheid dicht nadert, is voor een goede beschrijving van hun gedrag de relativistische mechanica onontbeerlijk. Gemakshalve zetten we de enkele relativistische formules die we veelvuldig zullen gebruiken hier bij elkaar.

Is m de rustmassa, v de snelheid van het deeltje, en c de snelheid van het licht (3×10^8 m/s), dan is de impuls p van het deeltje:

$$p = \frac{mv}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \beta\gamma mc, \quad \ldots\ldots \quad (1)$$

waarin

$$\beta = v/c \quad \text{en} \quad \gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}).$$

De totale energie E is:

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \gamma mc^2. \quad \ldots\ldots \quad (2)$$

De kinetische energie T is het verschil van de totale energie en de rustenergie mc^2:

$$T = E - mc^2. \quad \ldots\ldots\ldots \quad (3)$$

Elimineert men de snelheid v uit (1) en (2), dan vindt men voor het verband tussen de energie en de impuls:

$$E^2 = m^2c^4 + p^2c^2. \quad \ldots\ldots\ldots \quad (4)$$

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

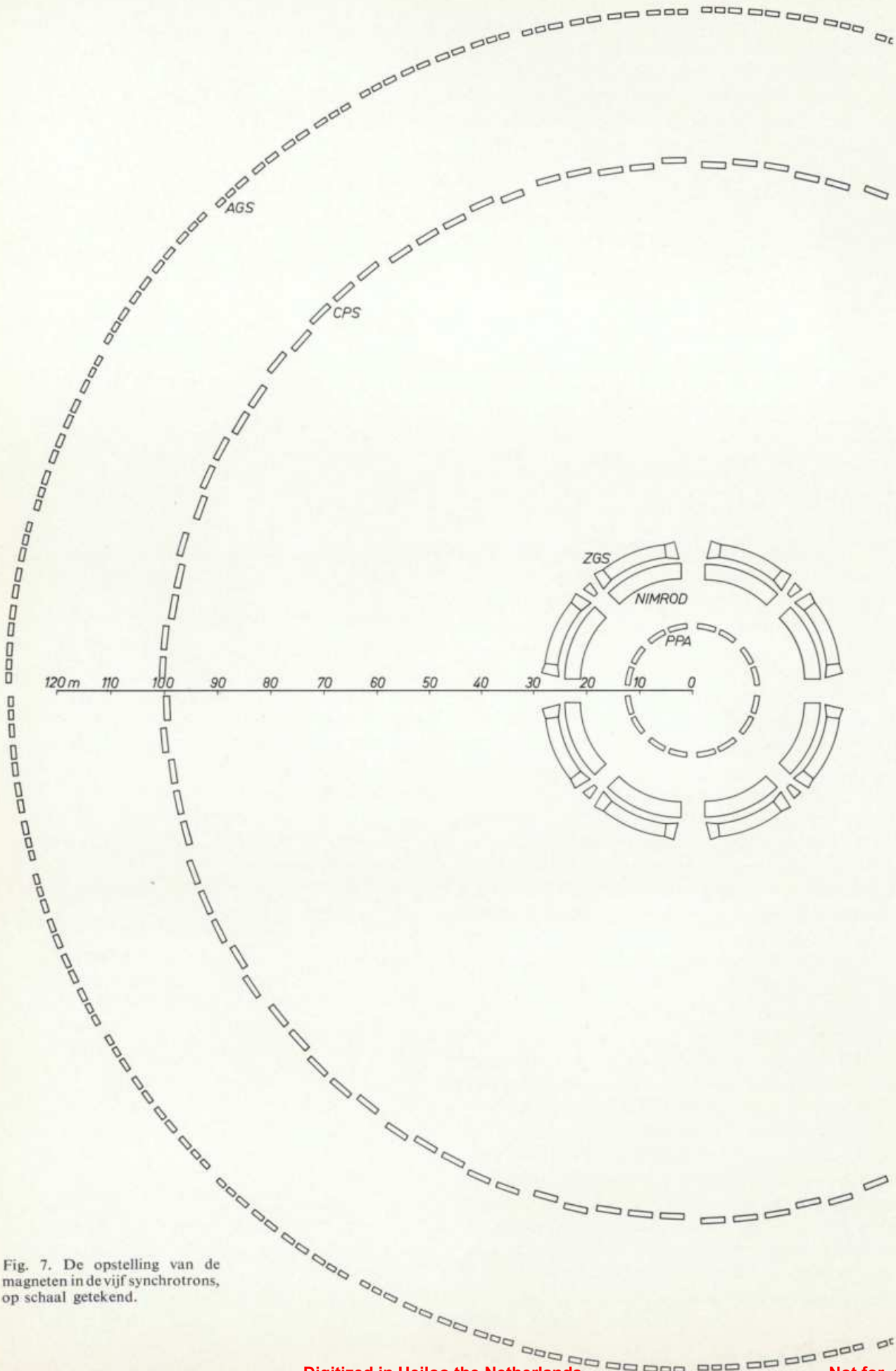


Fig. 7. De opstelling van de magneten in de vijf synchrotrons, op schaal getekend.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

I. Algemene beschrijving van een protonensynchrotron

Beweging van een proton in een magneetveld

De beweging van een proton (lading e) in het synchrotron wordt allereerst bepaald door de relatie

$$p = \varrho eB \qquad \ldots\ldots\ldots \quad (5)$$

tussen de impuls p van het proton, de kromtestraal ϱ van de baan en de inductie B van het magneetveld. Deze relatie (die in het vorige artikel reeds werd genoemd) wordt toegelicht in *fig. 8*.

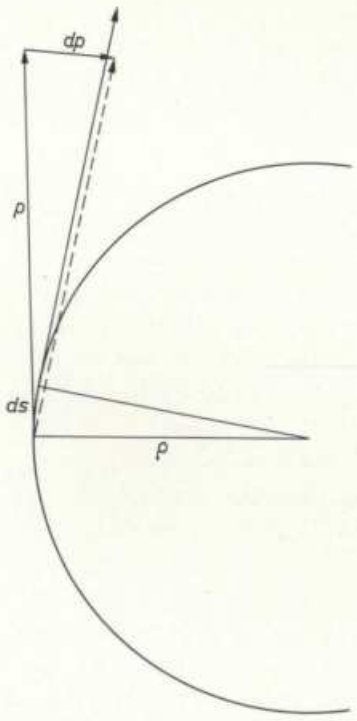


Fig. 8. Een deeltje met lading e, impuls p, in een homogeen magneetveld van inductie B beschrijft een cirkelbaan. De verandering dp van de impuls in een tijdje dt is $dp = evB\,dt$ (evB is de Lorentz-kracht). Met $v dt = ds$ en $dp/p = ds/\varrho$ (de impuls staat steeds loodrecht op de voerstraal) volgt hieruit onmiddellijk verg. (5).

De eindenergie van het deeltje wordt volgens (4) en (5) bepaald door ϱ en het eindveld B_f, dat op zijn beurt begrensd wordt door de verzadiging van het magneetstaal. In de praktijk is B_f gewoonlijk omstreeks 1,4 tesla (14 kilogauss) [2]. Daaruit volgt dat de kromtestraal des te groter moet worden gekozen naarmate de vereiste eindenergie groter is. Als men b.v. een versneller wil bouwen voor protonen ($mc^2 = 0{,}938$ GeV) met een totale eindenergie van 30 GeV (die dan voornamelijk kinetisch is, $E \gg mc^2$), dan is $pc \approx E = 30$ GeV, en met de genoemde waarde van de eindinductie B_f volgt $\varrho = p/eB \approx 3\times10^{10}/3\times10^{8}\times1{,}4 = 70$ m als waarde van de straal die men moet kiezen.

De *gemiddelde straal* R_0 van de versneller is groter dan de kromtestraal ϱ, ten gevolge van de aanwezigheid van rechte, veldvrije, stukken. R_0 is gedefinieerd als $1/2\pi$ maal de totale omtrek, gemeten langs de nominale baan van het proton.

De versnelling; de cyclus van het magneetveld en de frequentiezwaai

De deeltjes worden in versnellingsstations door elektrische wisselvelden versneld. De snelheid en de impuls van het deeltje nemen toe, en zowel het magneetveld als ook de frequentie van het versnellende wisselveld moeten daarmee in de pas blijven — het magneetveld volgens verg. (5) ten einde het deeltje in zijn baan te houden, en de frequentie van het elektrische veld ten einde het deeltje steeds aan een veld van de juiste, versnellende, faze bloot te stellen als het de versnellingsspleet passeert.

Daar de apparatuur die het magneetveld produceert door de hieraan inherente traagheid moeilijk te regelen is, kiest men in de praktijk een programma voor het magneetveld en past de frequentie van het elektrische veld daarbij aan. Gewoonlijk laat men het magneetveld gedurende de versnelling lineair met de tijd toenemen (*fig. 9*), waarna er een „vlakke top" volgt waarin experimenten kunnen worden gedaan. (In de PPA is het magneetveld een superpositie van een sinusvormig met de tijd variërend veld en een constant veld.) De energie die zich tijdens de top in het magneetveld bevindt wordt tijdens de veldloze periodes opgeslagen in vliegwielen of (bij de PPA) in condensatoren.

De deeltjes moeten dus zodanig worden versneld dat zij in de pas blijven met de gegeven magneetveldvariatie. Hiertoe moet in de eerste plaats de frequentie van het elektrische veld een geheel veelvoud zijn van de

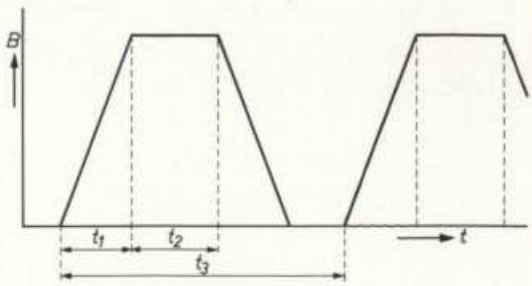


Fig. 9. De variatie van het magneetveld, schematisch. t_1 stijgtijd, waarin de versnelling plaatsvindt; t_2 „vlakke top" ten behoeve van de experimenten; t_3 periode van de cyclus.

[2] Deze beperking ten gevolge van de magnetische verzadiging zal in de toekomst wellicht worden opgeheven door het gebruik van magneetspoelen op lage temperatuur.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

omloopfrequentie f van het deeltje:

$$f = v/2\pi R, \quad \ldots\ldots \quad (6)$$

waarin $2\pi R$ de lengte is van de baan van het deeltje; v wordt volgens (1) en (5) door het magneetveld voorgeschreven. In de tweede plaats moet het elektrische veld in de versnellingsspleet een bepaalde waarde hebben als het deeltje de spleet passeert, ten einde het de juiste versnelling te geven. Zoals wij later zullen zien, wordt deze veldwaarde verkregen door een nauwkeurige regeling niet zo zeer van de amplitude als wel van de faze van het wisselveld ten opzichte van de rondlopende deeltjes.

Daar in de onderhavige versnellers de snelheid van de deeltjes na versnelling ver in het relativistische gebied ligt (d.w.z. de eindsnelheid is nagenoeg gelijk aan c), is de frequentiezwaai f_f/f_i die door het versnellende veld gemaakt moet worden nagenoeg gelijk aan c/v_i (f_f is de eindfrequentie en f_i en v_i zijn de frequentie en de snelheid bij injectie).

In dit verband merken wij op dat er in de praktijk een ondergrens bestaat voor de inductie van het magneetveld bij injectie, B_i. In de eerste plaats wordt een dergelijke ondergrens reeds gegeven door de remanentie van het magneetstaal. In de tweede plaats moet B_i, om goed gedefinieerd te zijn, groter zijn dan de spreidingsinducties langs de ring. Voor de grootste machines volgt nu uit verg. (5) dat bij een acceptabele waarde van B_i (ten minste omstreeks 10 millitesla = 100 gauss) het deeltje reeds met een relativistische snelheid moet worden geïnjecteerd (voor $B = 10$ mT, $\varrho = 70$ m vinden we $\beta = v/c \approx 0{,}2$). Op grond van andere overwegingen vindt men vaak een minimumwaarde voor de snelheid (en de energie) bij injectie die nog groter uitvalt. Een prettige kant van deze eisen aangaande de injectie-energie is dat de frequentiezwaai die de apparatuur moet maken kleiner is naarmate v_i dichter bij c ligt. Bij de kleinere machines, met injectiesnelheden in het niet-relativistische gebied, is de vereiste frequentiezwaai veel groter.

Met (1), (5) en (6) vindt men voor de frequentie als functie van het magneetveld:

$$f/f_c = \frac{B}{\sqrt{B^2 + B_\varrho^2}}, \quad \ldots\ldots \quad (7)$$

waarin $f_c = c/2\pi R$ en $B_\varrho = mc/e\varrho$. De grootheid f_c is de asymptotische waarde van de frequentie voor $v \to c$ ($f_f \approx f_c$).

In het algemeen kiest men voor de frequentie f_a van het versnellende veld een geheel veelvoud van de omloopfrequentie f:

$$f_a = hf. \quad \ldots\ldots \quad (8)$$

De keuze van h zal later worden besproken.

De protonen worden in feite versneld door resonerende trilholtes (in de PPA gecombineerd met een „loopbuis") waarbij de versnellende spanning over een spleet in het metaal van de vacuümkamerwand staat. Deze trilholtes zijn in het voorgaande artikel besproken (zie de fig. 5 en 7 aldaar), zodat we hierop niet nader behoeven in te gaan.

Gewoonlijk zijn er verscheidene (M) trilholtes gelijkmatig over de ring verdeeld. Bij een gegeven energietoeneming van het deeltje per omloop is de vereiste spanning V per trilholte evenredig met M^{-1}. Voor een trilholte van gegeven constructie is het gedissipeerde vermogen evenredig met V^2 en derhalve met M^{-2}. Het totale vereiste vermogen is dan evenredig met M^{-1}. Dit kan dus worden gereduceerd door het aantal trilholtes groter te kiezen.

De focusserende eigenschappen van de versneller; oscillaties van de deeltjes

Als aan verg. (7) precies zou worden voldaan, dan zou men in termen van verg. (5) en (6) een ideaal deeltje kunnen definiëren dat zich langs een nominale baan met nominale impuls beweegt. Versnelling volgens de boven beschreven principes zou in de praktijk echter geheel mislukken, ware het niet dat deeltjes die lichtelijk van het ideale gedrag afwijken óók versneld kunnen worden. Dit is het gevolg van de „focusserende eigenschappen" van de versneller.

Men kan twee soorten afwijkingen van het ideale gedrag en twee soorten focussering onderscheiden. In de eerste plaats kunnen de deeltjes zijwaarts afwijken van de nominale baan; zij worden door „transversale" focussering binnen de ring gehouden. De deeltjes voeren dan „betatron-oscillaties" uit om een evenwichtsbaan in de ring. In de tweede plaats kunnen de deeltjes een longitudinale afwijking (een afwijking in azimut) hebben van het ideale deeltje, dat bij de juiste faze van de versnellende spanning de spleet passeert. De deeltjes worden dan voor de versnelling behouden door „longitudinale" of „faze-"focussering, en zij voeren „synchrotron-oscillaties" uit om het ideale deeltje. De bespreking van deze focusserende eigenschappen wordt vereenvoudigd door het feit dat de energietoeneming van het deeltje per omloop klein is vergeleken met de deeltjesenergie zelf. Dientengevolge kan men de transversale focussering, met de betatron-oscillaties, afzonderlijk bestuderen in de „adiabatische benadering", waarin de versnelling wordt verwaarloosd. Tot dit geval zullen we ons in het volgende hoofdstuk beperken.

Transversale focussering en betatron-oscillaties

In verband met de transversale focussering onderscheidt men twee soorten machines: a) *Machines met gecombineerde functies*, waarin de transversale focussering ontstaat door hetzelfde magneetveld dat voor de

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

kromming van de baan van de deeltjes in de ring zorgt. De focussering is daarbij het resultaat van een zorgvuldig gekozen transversale gradiënt in het afbuigveld. b) *Machines met gescheiden functies*, waarin de focussering en de kromming zijn gescheiden; men heeft daarbij hetzij afzonderlijke afbuigmagneten (met vlakke polen) en focusserende magneten („quadrupool-lenzen"), of, zoals in de ZGS, alleen afbuigmagneten waarvan echter de eindvlakken ten behoeve van de focussering een speciale vorm hebben. Van de vijf onderhavige synchrotrons heeft alleen de ZGS gescheiden functies, de andere zijn machines met gecombineerde functies. Behalve de genoemde afbuig- en focusseermagneten installeert men in het algemeen in de rechte stukken nog een aantal correctiemagneten — die multipool-(dipool-, quadrupool-, sextupool- en octupool-)magneetvelden kunnen produceren —, voor een bijregeling van de afbuig- en focusseringseigenschappen van de ring.

Focussering met behulp van een transversale veldgradiënt

Zoals boven reeds werd aangestipt, kan men focussering bewerkstelligen met behulp van een transversale gradiënt in het afbuigveld. Deze verkrijgt men door de poolschoenen te profileren. Beschouw b.v. eens de magneet van *fig. 10a*, met naar buiten wijkende poolschoenen. De krachtlijnen zijn gekromd met de bolle kant naar buiten, en het veld neemt af met toenemende afstand r van het centrum van de versneller. Men definieert een *veldindex* n volgens:

$$\frac{\partial B}{\partial r} = -n\frac{B_0}{\varrho_0}, \quad \ldots\ldots\ldots \quad (9)$$

waarin B_0 het veld en ϱ_0 de kromtestraal is die bij de nominale evenwichtsbaan C behoort. In fig. 10*a* is n *positief*. Daar de Lorentz-kracht altijd loodrecht op het veld staat, ondervindt een deeltje in A, met nominale

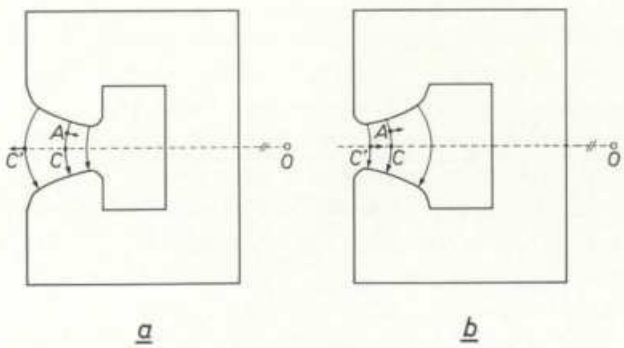


Fig. 10. Profielen van focusseermagneten (schematisch). Het centrum O van het synchrotron ligt rechts. C nominale baan. *a*) Een D-sector; hierin wordt een deeltje in A, met een verticale afwijking, naar C teruggedreven, maar een deeltje in C', met een horizontale afwijking, beweegt zich van C af (als n groot is). Een dergelijke sector is dus verticaal focusserend, maar horizontaal defocusserend. *b*) Een F-sector, waarin de situatie omgekeerd is.

snelheid, een kracht met een component die het terugstuurt naar het middenvlak: de magneet is verticaal focusserend. Anderzijds is, voor grote n, het veld in C' veel kleiner dan in C; de kromming van de baan van een deeltje met nominale snelheid is dus te klein en het verwijdert zich van C: de magneet is horizontaal *de*-focusserend. Een dergelijke magneet wordt een D-sector genoemd. De in fig. 10*b* afgebeelde magneet wordt een F-sector genoemd: de veldindex is daarbij *negatief*, de magneet is horizontaal focusserend en verticaal de-focusserend.

Voor de verticale component B_z en de horizontale component B_r van de inductie geldt:

$$B_z = B_0 + g\Delta r, \quad \ldots\ldots\ldots \quad (10a)$$

$$B_r = gz, \quad \ldots\ldots\ldots \quad (10b)$$

waarin Δr de horizontale en z de verticale afstand is van de nominale baan, en waarin g evenredig is met n en met de nominale impuls p. Combineert men (10a) met (9) en (5), dan vindt men $g = -np/e\varrho_0^2$. De coëfficiënt in (10b) moet eveneens g zijn, om aan de vergelijking rot $B = 0$ te voldoen. Het veld is een superpositie van een homogeen afbuigveld met alleen een verticale component $B_z = B_0$ en een focusserend quadrupoolveld met componenten $g\Delta r$ en gz. In een machine met *gescheiden* functies heeft men *in* de magneten (met vlakke polen) alleen het verticale homogene afbuigveld ($B_z = B_0$), en *tussen* de magneten een veld met alleen quadrupoolcomponenten $B_z = g\Delta r$, $B_r = gz$; deze worden geproduceerd door quadrupoollenzen of door een speciale vorm van de magneeteindvlakken.

De regel dat een focusserend effect in de horizontale richting samengaat met een defocusserend effect in de verticale richting, en omgekeerd, is een direct gevolg van de relatie rot $B = 0$.

Zwakke of CG-focussering

Uit het bovenstaande is men wellicht geneigd te concluderen dat focussering in beide richtingen, zowel horizontaal als verticaal, tegelijkertijd niet mogelijk is. Kijkt men echter nauwkeuriger, dan blijkt dat een D-sector (waarbij dus $n > 0$) zowel verticaal als horizontaal focusserend is als n voldoende klein is. Om dit te zien beschouwen we in *fig. 11* een deeltje in C' met nominale snelheid. We moeten nu onderscheid maken tussen de afstand r van het centrum van de nominale baan ($r = OC' = \varrho_0 + \Delta r$) en de ogenblikkelijke kromtestraal $\varrho' = O'C'$, die bepaald wordt door de lokale inductie $B_0 + \Delta B$ in C'. De afwijking ΔB volgt uit verg. (9):

$$\Delta B = \frac{\partial B}{\partial r}\Delta r = -n\frac{B_0}{\varrho_0}\Delta r.$$

De ogenblikkelijke kromtestraal is:

$$\varrho' = \varrho_0 + \Delta\varrho,$$

waarin volgens verg. (5):

$$\Delta\varrho/\varrho_0 = -\Delta B/B_0.$$

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Combinatie van deze vergelijkingen levert:

$$\varrho' = \varrho_0 + n\Delta r.$$

Het deeltje in C' zal naar de evenwichtsbaan teruggaan als O' aan dezelfde kant ligt van O als C' van C, met andere woorden, als OO' en $CC' = \Delta r$ hetzelfde teken hebben. Nu is $OO' = OC + CC' - O'C' = \varrho_0 + \Delta r - (\varrho_0 + n\Delta r) = \Delta r(1-n)$. Derhalve is een D-sector — zij het slechts zwak — horizontaal focusserend als $n < 1$.

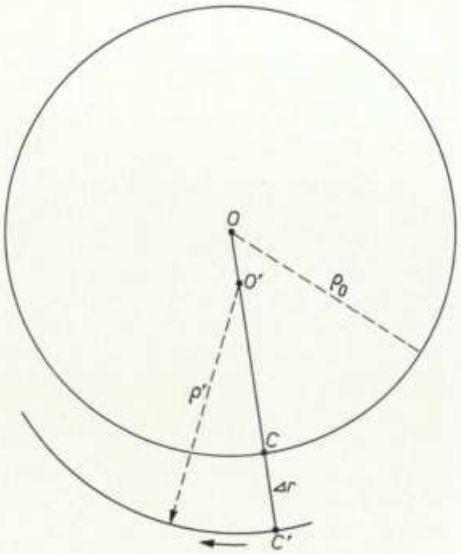


Fig. 11. Horizontale zwakke focussering. Een deeltje in C', met nominale snelheid, maar op een afstand Δr van de nominale baan C, heeft een ogenblikkelijke kromtestraal ϱ', die bepaald wordt door het veld in C'. Horizontale focussering treedt op als OO' hetzelfde teken heeft als $CC' = \Delta r$. Dit leidt tot de voorwaarde $n < 1$ (zie tekst).

Versnellers die volgens dit principe werken noemt men CG-versnellers of zwak focusserende versnellers (CG = „constant gradient"). Hierin worden alleen D-magneten gebruikt, alle met dezelfde n-waarde. De voorwaarde voor stabiliteit bij een CG-versneller is volgens het bovenstaande:

$$0 < n < 1. \quad \ldots\ldots\ldots \quad (11)$$

Betatron-oscillaties

Ten gevolge van de magnetische krachten die de deeltjes terugdrijven naar de evenwichtsbaan zullen de deeltjes die zich niet op deze baan bevinden oscillaties daaromheen uitvoeren, min of meer als harmonische oscillatoren. Dit zijn de zg. betatron-oscillaties; deze werden voor het eerst ontdekt in het betatron [3].

In een machine met gecombineerde functies zijn de afbuigende en de focusserende velden afkomstig van dezelfde magneten en nemen derhalve gedurende de versnelling in gelijke mate toe, evenredig met de impuls van de deeltjes. Derhalve is overal in de magneetruimte de lokale kromtestraal, die de baangeometrie bepaalt, constant in de tijd. Dientengevolge is het aantal betatronperiodes per omloop (= het aantal betatrongolflengten op de omtrek), dat we met ν zullen aangeven [4], constant gedurende de versnelling. De frequentie van de betatron-oscillaties is νf, waarin f de omloopfrequentie is (verg. 6). Voor een CG-machine zonder rechte stukken vindt men in het bijzonder:

$$\left.\begin{aligned} \nu_H &= \sqrt{1-n}, \\ \nu_V &= \sqrt{n}, \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots \quad (12)$$

waarin ν_H en ν_V de aantallen betatronperiodes per omloop zijn in het horizontale en in het verticale vlak.

De verg. (12) zijn in overeenstemming met (11): een imaginaire frequentie impliceert exponentieel in plaats van oscillatorisch gedrag, dat wil zeggen instabiliteit. Onder de stabiliteitsvoorwaarde (11) zijn ν_H en ν_V reëel. Wij merken nog op dat beide kleiner zijn dan 1, hetgeen karakteristiek is voor een zwak focusserende machine.

De ν's kunnen bijgeregeld worden door middel van quadrupoollenzen in de rechte stukken (zie blz. 349). Als men dit doet, is ν niet meer constant gedurende de versnelling (tenzij de lenzen elektrisch in serie staan met de afbuigmagneten en dezelfde verzadigingskarakteristiek hebben). Dit geldt in het bijzonder voor een machine met gescheiden functies.

Gedurende de versnelling van het deeltje nemen de betatronfrequenties $\nu_H f$ en $\nu_V f$ toe evenredig met de omloopfrequentie f. Dit gaat gepaard met een afneming van de betatronamplitudes, *zodat de bundel krimpt*: een brede bundel gaat over in een nauwe bundel. Dit dempingsproces correspondeert met de afneming die de amplitude van een conventionele harmonische oscillator vertoont indien de massa en de terugdrijvende kracht gestadig toenemen. De betatronamplitudes in de beide vlakken zijn evenredig met $(\beta\gamma)^{-1/2}$ ofte wel met $B^{-1/2}$ of $p^{-1/2}$, hetgeen men kan aantonen met behulp van het theorema van Liouville.

Resonantie

In de praktijk zijn niet alle waarden van n die aan verg. (11) voldoen bruikbaar; bepaalde waarden — b.v. die corresponderen met ν_H of $\nu_V = \frac{1}{2}$ — moeten worden uitgesloten om resonantie van de betatron-oscillaties met de omloop van het deeltje te vermijden. Treedt een dergelijke resonantie op, dan worden de kleine verstoringen die het gevolg zijn van kleine onregelmatigheden in de machine elke keer dat het deeltje daar langs komt versterkt, en de deeltjes gaan ras teloor. Bij afwezigheid van resonantie heffen dergelijke verstoringen elkaar gemiddeld op. Deze overweging is op alle soorten synchrotrons van toepassing, inclusief de nog te bespreken machines waarin het aantal betatronperiodes ν per omloop groter dan 1 is. Voor elke versneller wor-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

den de verboden waarden voor de ν's, althans in principe, gegeven door:

$$\left.\begin{aligned} l\nu_H + m\nu_V &= k, \\ \text{met} \quad k,l,m &= 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \ldots \end{aligned}\right\} \quad . \quad (13)$$

Het is natuurlijk niet mogelijk de relatie (13) voor alle gehele getallen k, l, m te vermijden. In de praktijk zijn alleen de „lagere" resonanties gevaarlijk.

Impulscompactie

We voeren thans een begrip in dat van nut zal zijn bij de studie van de injectieprocedure: de „impulscompactiefactor" α. Voor de nominale evenwichtsbaan C zijn de nominale waarden B_0, ϱ_0 en p_0 voor de inductie, de straal en de impuls verbonden door verg. (5). Een deeltje met impuls $p = p_0 + \Delta p$ kan op een andere evenwichtsbaan, met straal $\varrho = \varrho_0 + \Delta\varrho$, worden ondergebracht als aan verg. (5) tussen p, ϱ en B op deze nieuwe baan is voldaan. Tussen B en ϱ, ofwel tussen ΔB en $\Delta\varrho$, bestaat (volgens verg. 9) een relatie die bepaald wordt door het profiel van de magneet. Derhalve staan Δp en $\Delta\varrho$, voor evenwichtsbanen, direct met elkaar in verband. Voor een gegeven machine is er dan tevens een direct verband tussen Δp en ΔR. De impulscompactiefactor α is nu per definitie:

$$\alpha = \frac{\Delta R/R_0}{\Delta p/p_0}. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (14)$$

Een kleine waarde van α („sterke impulscompactie") is gunstig in die zin dat deeltjes met zeer verschillende impulsen dan ondergebracht kunnen worden in banen die slechts weinig van straal verschillen (dus in een nauwe vacuümkamer).

Uit (5) volgt $\Delta p/p_0 = \Delta B/B_0 + \Delta\varrho/\varrho_0$, en uit (9), als n langs de ring constant is, $\Delta B/B_0 = -n\Delta\varrho/\varrho_0$, dus $\Delta p/p_0 = (1-n)\Delta\varrho/\varrho_0$. Voor een CG-versneller zonder rechte stukken ($\varrho_0 = R_0$) geldt dus:

$$\alpha = 1/(1-n) = 1/\nu_H^2. \quad . \quad (15)$$

Men kan aantonen dat voor elk synchrotron waarbij de rechte stukken niet meer dan omstreeks 20% van de omtrek beslaan geldt:

$$\alpha \approx 1/\nu_H^2. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (16)$$

Als de terugdrijvende krachten in het horizontale vlak groot zijn, hetgeen in *snelle* betatron-oscillaties (ν_H groot) tot uiting komt, is de impulscompactie dus sterk (α klein).

Sterke of AG-focussering

In de zg. sterk focusserende of AG-versnellers (AG = „alternating gradient") heeft men niet uitsluitend D-sectoren, maar, zoals de tweede naam al zegt, afwisselend D- en F-sectoren in de ring. In het algemeen zijn de sectoren van gelijke lengte. De waarde van de veldindex n, die dus afwisselend positief en negatief is, kiest men in dit geval zeer groot (omstreeks 300).

In de CPS te Genève zijn de D- en F-sectoren gecombineerd tot DF- of FD-eenheden (waarvan men er enkele ziet in fig. 4). In de AGS te Brookhaven zijn er afzonderlijke D- en F-sectoren. Tussen de eenheden bevinden zich rechte veldvrije stukken (O). De gehele ring bestaat nu uit een groot aantal identieke „perioden", waarbij elke periode b.v. als volgt is samengesteld: FDODFO (CPS) of FODODOFO (AGS).

Men kan aantonen dat een dergelijke opstelling focusserende eigenschappen kan hebben, en dat de focusserende werking zeer veel sterker kan zijn dan bij CG-machines [5]. Berekent men de baan van een proton dat zich beweegt in een opeenvolging van afwisselend D- en F-sectoren (van gelijke lengte en met gelijke, grote, waarde van n), dan vindt men voor het horizontale vlak natuurlijk dat de baan ter plaatse sinusoïdaal (convergerend) is in een F-sector, en hyperbolisch (divergerend) in een D-sector; voor het verticale vlak is de situatie omgekeerd. Maar uit de berekening volgt verder dat *in beide vlakken, tot grote waarden van n, het netto resultaat van een serie F- en D-sectoren een focusserende werking is, en dat de baan stabiel is.* Overschrijdt n een zekere kritische waarde, die afhangt van de lengte van de sectoren, dan wordt de baan instabiel [6]. Een stabiele baan is afgebeeld in *fig. 12a* en een instabiele in fig. 12*b*. In het geval dat er ook rechte stukken zijn verkrijgt men soortgelijke resultaten, en een stabiele baan voor een dergelijk geval is afgebeeld in fig. 12*c*.

De focusserende eigenschappen van een serie D- en F-sectoren hebben een bekende analogie in de optiek. In de eerste plaats merken we op dat een convergente en een divergente lens van gelijke sterkte $\pm 1/F$, gescheiden door een afstand L, een convergent optisch systeem vormen. Relevanter voor het onderhavige probleem is echter dat de doorsnede van een lichtbundel die een reeks lenzen volgt welke goed uitgelijnd en op onderlinge afstand L geplaatst zijn, en welke afwisselend de sterkte $+1/F$ en $-1/F$ hebben, beperkt blijft zolang $L < 2F$ is.

In een stabiele baan (fig. 12*c*) voert elk proton grote horizontale en verticale slingerbewegingen uit om de

[3] Voor betatrons (versnellers voor elektronen waarbij dezelfde soort magnetische afbuiging en focussering wordt gebruikt) zie b.v. A. Bierman en H. A. Oele, Philips techn. T. **11**, 65, 1949.

[4] In de literatuur wordt dit aantal vaak aangegeven met „Q".

[5] De AG-methode van focussering werd in 1938 (voor cyclotrons) voorgesteld door L. H. Thomas (Phys. Rev. **54**, 580 en 588, 1938) en onafhankelijk daarvan opnieuw in 1950 door N. Christophilos (niet gepubliceerd; zie echter: E. D. Courant, M. S. Livingston, H. S. Snyder en J. P. Blewett, Phys. Rev. **91**, 202, 1953) en in 1952 door E. D. Courant, M. S. Livingston en H. S. Snyder (Phys. Rev. **88**, 1190, 1952).

[6] Theoretisch is het niet nodig dat de waarde n_1 van n in de D-sectoren gelijk is aan de waarde n_2 van n in de F-sectoren. In het algemeen kan men in het (n_1, n_2)-vlak bepaalde gebieden aanwijzen waarin de banen stabiel zijn.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

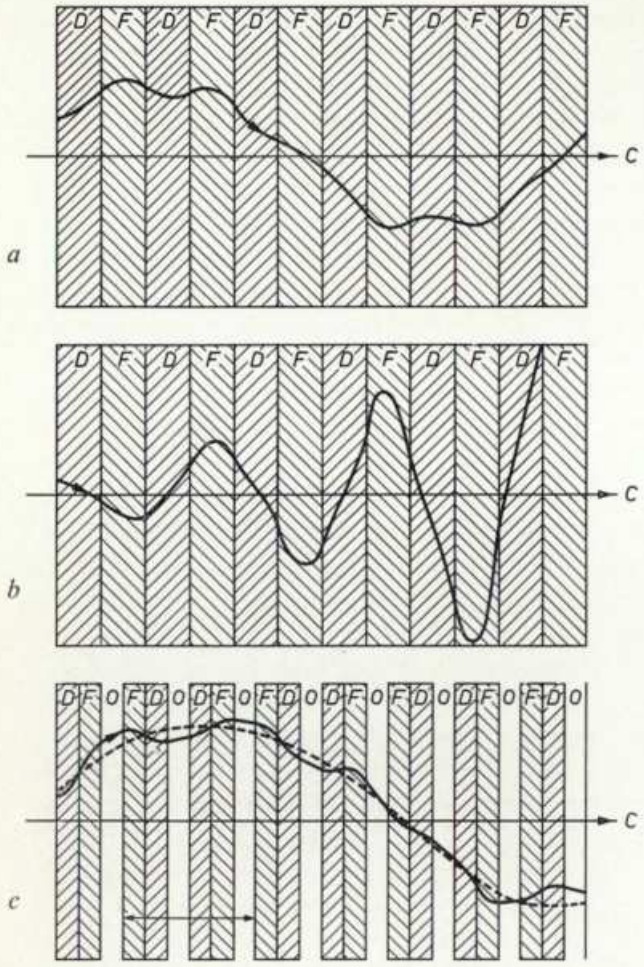


Fig. 12. Baan van een deeltje in een opeenvolging van D- en F-magneten van gelijke lengte en met gelijke (grote) waarde van n. In *a*) ligt n beneden de kritische waarde, de baan is stabiel. In *b*) is n te groot, de baan is instabiel. *c*) Een stabiele baan in een opeenvolging van magneten met tussenliggende „rechte stukken".

Op de grote betatronslinger is een rimpel gesuperponeerd ten gevolge van het passeren van de individuele D- en F-magneten. De transversale uitwijkingen zijn sterk overdreven, vergeleken met de longitudinale afmetingen. De dubbele pijl in (*c*) geeft een periode van de magneetstructuur aan.

evenwichtsbaan (de eigenlijke betatron-oscillaties); hierop is een korte „rimpel" gesuperponeerd, die ontstaat bij het passeren van de individuele D- en F-sectoren.

De aantallen betatronperiodes per omloop, ν_H in het horizontale vlak en ν_V in het verticale vlak, zijn nu gecompliceerde functies van n.

Ook beneden de genoemde kritische waarde zijn niet alle waarden voor n toegestaan: ten einde resonantie te voorkomen, moeten die waarden worden vermeden waarvoor ν_V en ν_H aan (13) voldoen.

Ten gevolge van de zeer hoge waarden van n is de gemiddelde terugdrijvende kracht — hoewel zeer veel kleiner dan de terugdrijvende kracht in het horizontale vlak in een F-sector of in het verticale vlak in een D-sector — veel groter dan in een CG-machine. Dit brengt tevens met zich mee dat de aantallen betatronperiodes per omloop, ν_H en ν_V, veel groter zijn dan in het CG-geval; zij blijken groter te zijn dan 1. In de CPS is b.v. $n = 288$, $\nu_H = \nu_V = 6{,}25$. Voor een gegeven hoekspreiding van de deeltjes is de amplitude van de betatron-oscillaties omgekeerd evenredig met ν, zodat elke vergroting van ν een mogelijkheid tot verkleining van de vacuümkamer, en derhalve van de magneetafmetingen, met zich meebrengt.

De grote gemiddelde terugdrijvende kracht komt ook tot uiting in een sterke impulscompactie (zie verg. 16). Ook om deze reden kan men dus, bij een gegeven impulsspreiding, de vacuümkamer klein houden, maar de sterke impulscompactie schept wel moeilijkheden bij de injectie, zoals wij later zullen zien.

ZG-focussering

In het „Zero Gradient Synchrotron" (ZGS) in Argonne ontstaat de focusserende werking op een geheel andere wijze. De poolschoenen van de afbuigmagneten zijn vlak en evenwijdig, zodat het veld homogeen is (de gradiënt is nul, $n = 0$). De focusserende werking wordt hier verkregen door magneten te gebruiken met eindvlakken die niet loodrecht staan op de nominale baan (*fig. 13*).

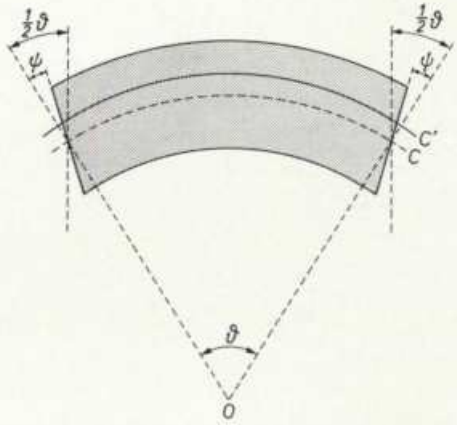


Fig. 13. Horizontale eindvlakfocussering. ϑ afbuighoek van de magneet. ψ hoek tussen het eindvlak en het vlak loodrecht op de nominale baan C. Is $\psi < \vartheta/2$, dan is voor een deeltje met nominale snelheid de weg in de magneet langer langs C' dan langs C, zodat het deeltje meer wordt afgebogen.

Dat een opstelling als in fig. 13 (met $\psi < \vartheta/2$) focusserende eigenschappen in het horizontale vlak heeft, ziet men gemakkelijk in. De weglengte *in* de magneet van een deeltje met nominale snelheid langs de baan C' is groter dan langs de nominale baan C, als C' buiten C ligt. Het deeltje ondergaat dus meer buiging en wordt derhalve teruggedreven naar de nominale baan.

Dat de opstelling ook focusserend werkt in het verticale vlak, ziet men als volgt. *Fig. 14a* geeft de door-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

snede volgens een verticaal vlak dat loodrecht op het eindvlak staat, gezien van de zijde van het centrum. Het randveld is evenwijdig met dit vlak. De horizontale component daarvan is boven het mediane vlak (zie P) naar het eindvlak toe gericht, en beneden dit vlak (zie Q) er van af. In fig. 14*b* (het eindvlak van boven gezien, als in fig. 13) ziet men dat in P de horizontale veldcomponent loodrecht op de snelheid naar het centrum toe is gericht. Dit leidt tot een naar beneden gerichte component van de Lorentz-kracht. In Q is de situatie omgekeerd, zodat er een naar boven gerichte Lorentz-component is. Meer algemeen kan men de verticale focussering in verband brengen met die van de

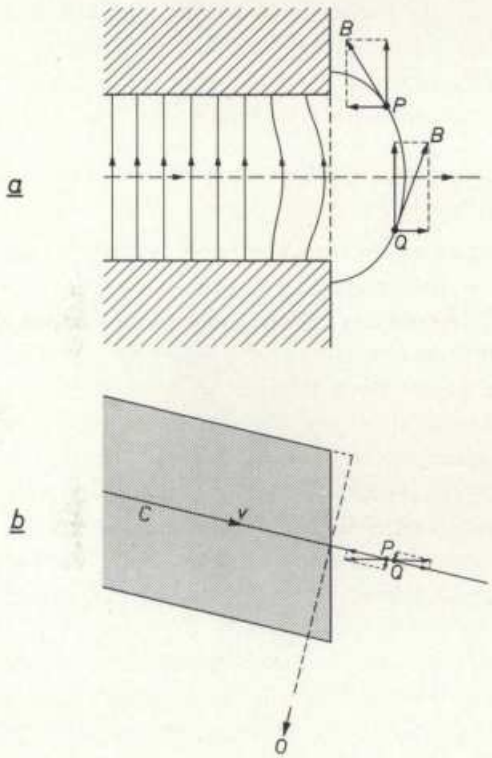


Fig. 14. Verticale eindvlakfocussering. *a*) Doorsnede in een verticaal vlak loodrecht op het eindvlak, gezien van de kant van het centrum. *b*) Het mediane vlak van boven gezien. Uit een ontbinding van het randveld blijkt dat de Lorentz-kracht een naar beneden gerichte component in P heeft en een naar boven gerichte component in Q (zie tekst).

D-magneet van fig. 10*a*. Immers, ten gevolge van de scheve eindvlakken neemt het totale veld, gemiddeld over een baan, af met toenemende straal van de baan. Dit komt met een negatieve horizontale gradiënt overeen, als in fig. 10*a*.

Daar bij alle eindvlakken de krachten op de protonen van de terugdrijvende soort zijn, en niet afgewisseld worden door afstotende krachten, moet men deze machine beschouwen als een *zwak focusserende machine*, en men kan aantonen dat ook hier de ν's kleiner zijn dan 1. Daar afbuiging en focussering plaatsvinden in verschillende gedeelten van het magneetveld, kan men deze machine in zekere zin beschouwen als een machine met gescheiden functies. De afbuig- en focusseringseigenschappen van de ZGS-ring kunnen worden bijgeregeld met behulp van vier correctiemagneten tussen de hoofdmagneetoctanten (zie de fig. 7 en 31).

De protonenbeweging in de transversale fazeruimte; acceptantie en emittantie

De betatron-oscillaties van een deeltje om de nominale baan kunnen overzichtelijk worden beschreven in de „transversale fazeruimte" (*fig. 15*). Dit is een

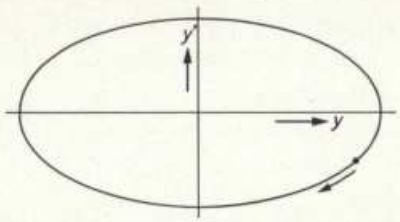


Fig. 15. De transversale fazeruimte. De coördinaten zijn y, de (horizontale of verticale) afwijking van de nominale baan C, en $y' = \mathrm{d}y/\mathrm{d}s$, waarin s de lijncoördinaat langs C is. In de sinusoïdale benadering en onder verwaarlozing van de versnelling beschrijft een deeltje een ellips in dit vlak; één omwenteling is een betatronperiode. De afmeting van de ellips varieert van deeltje tot deeltje, maar alle ellipsen zijn gelijkvormig (en blijven dat gedurende de versnelling).

coördinatenvlak waarin de abscis de afwijking y van de nominale baan C is, en de ordinaat $y' = \mathrm{d}y/\mathrm{d}s$ (s = lijncoördinaat langs C); y' is de hoek tussen de echte baan en C. Men werkt met twee dergelijke vlakken, één voor de horizontale en één voor de verticale beweging.

In de sinusoïdale benadering (de sinuskromme van fig. 12*c*, met verwaarlozing van de „rimpel") wordt de betatronbeweging van een deeltje in een synchrotron, in elk der vlakken, beschreven door:

$$y = a\,\bar{\beta}^{1/2}\cos(\nu\vartheta + \delta), \quad \ldots \quad (17)$$

waarin ϑ het azimut is ($\vartheta = s/R$) en a en δ constanten zijn. $\bar{\beta}$ is het gemiddelde van de zg. „amplitudefunctie" $\beta(\vartheta)$ [7], die, evenals de constante ν, een belangrijk kenmerk van het synchrotron is. Deze grootheid, die de rimpel van de baan (zie fig. 12*c*) beschrijft, oscilleert als functie van ϑ met de periode van de magneetstructuur tussen twee extreme waarden $\beta_{\max}$ en $\beta_{\min}$. Men voert een zg. vormfactor F in:

$$F = \beta_{\max}/\bar{\beta}, \quad \ldots \ldots \quad (18)$$

[7] Wij zullen, in overeenstemming met het ingeburgerde gebruik, vasthouden aan de notaties $\bar{\beta}$, $\beta(\vartheta)$, $\beta_{\max}$ en $\beta_{\min}$. Vrees voor verwarring met de grootheid $\beta = v/c$ hoeft niet te bestaan, daar β met de genoemde nadere aanduidingen alleen voorkomt in de betekenis van amplitudefunctie.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

die gewoonlijk tussen 1 en 1,4 ligt. De gemiddelde waarde $\bar{\beta}$ van de amplitudefunctie is:

$$\bar{\beta} = R_0/\nu. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (19)$$

Door differentiatie naar s vindt men, in de sinusoïdale benadering:

$$y' = -a\,\bar{\beta}^{-1/2} \sin(\nu\vartheta + \delta). \quad . \quad . \quad (20)$$

In de transversale fazeruimte beschrijft het deeltje dus een ellips met een assenverhouding $\bar{\beta}$ waarop de rimpel is gesuperponeerd. Eén omloop langs de ellips is een betatronperiode, en er worden ν van deze omlopen uitgevoerd gedurende één omloop langs de ring.

De oppervlakte van het voor injectie bruikbare stuk van de fazeruimte noemt men de *admittantie* of *acceptantie* A van een versneller: protonen die worden geïnjecteerd met fazeruimtecoördinaten in dit stuk, kunnen met succes tot de eindsnelheid worden versneld, terwijl alle andere deeltjes op de vacuümkamerwand terecht komen en verloren gaan. De acceptantie is dus een maat voor het aantal geïnjecteerde deeltjes dat door de machine kan worden geaccepteerd. De bundel-*emittantie* is de oppervlakte van dat stuk fazeruimte dat de coördinaten van de deeltjes in de bundel bevat. Bij injectie gaat er geen enkel deeltje verloren als de emittantie van de geïnjecteerde bundel, dank zij een goede aanpassing, volledig binnen de acceptantie van de machine ligt.

De oppervlakte van de ellips van fig. 15 is πa^2 (zie verg. 17 en 20). Is q_H de halve doorsnede van de kamer in het horizontale vlak, dan geldt voor de grootst mogelijke waarde van a, in de sinusoïdale benadering, $q_H = a\bar{\beta}_H^{1/2}$. De acceptantie in het horizontale vlak, A_H, zou derhalve $\pi q_H^2/\bar{\beta}_H$ zijn. Houdt men nog rekening met de rimpel, dan krijgt men:

$$A_H = \pi q_H^2/\beta_{H\,max} = \pi q_H^2\,\nu_H/FR_0. \quad . \quad . \quad (21)$$

De acceptantie is dus evenredig met ν. Een AG-machine heeft dus een grotere acceptantie dan een CG-machine met dezelfde straal en dezelfde vacuümkamerdoorsnede. Voor A_V, de acceptantie in het verticale vlak, kan men een soortgelijke uitdrukking afleiden. De „totale acceptantie" is het produkt $A_H A_V$. (Gewoonlijk is $\nu_H \approx \nu_V$ en $\beta_{H\,max} \approx \beta_{V\,max}$, maar dit is niet noodzakelijk het geval.)

In het ideale geval is de bundel-emittantie bij injectie een ellips die de machine-acceptantie precies vult. Zoals we eerder zagen, krimpt de bundel gedurende de versnelling. De betatronamplitudes nemen af evenredig met $B^{-1/2}$ en de emittantie dus evenredig met B^{-1}, of (zie verg. 5 en 1) met $(\beta\gamma)^{-1}$. De grootheid die men krijgt door de emittantie met $\beta\gamma$ te vermenigvuldigen is derhalve onafhankelijk van de deeltjesenergie. Dit is de zg. *gereduceerde emittantie*. Op analoge wijze kan men een *gereduceerde acceptantie* definiëren, die, zoals we later zullen zien, een nuttig criterium vormt bij het vergelijken van synchrotrons.

Verg. (21) geeft de acceptantie in het horizontale vlak voor het ideale geval van een mono-energetische bundel in een zuiver rechthoekige kamer. In de praktijk is de acceptantie kleiner ten gevolge van de impulsspreiding in de geïnjecteerde bundel, de synchrotron-oscillaties, het niet ideaal zijn van de magneetopstelling, de afwijkende vorm van de vacuümkamer enz. In het bijzonder gaat een afwijking Δp van de nominale impuls p_0 (samenhangend met energiespreiding in de geïnjecteerde bundel en synchrotron-oscillaties) volgens verg. (14) gepaard met een afwijking ΔR van de straal R ten opzichte van de nominale straal R_0; hierdoor wordt de maximale betatronamplitude verkleind tot $q_H - \Delta R$. Bovendien wordt de betatronfrequentie iets anders, nl. $\nu + \Delta\nu$, waarin $\Delta\nu/\nu \approx -\Delta p/p$ is.

Fazefocussering, synchrotron-oscillaties en de overgangsenergie

Na de beweging van het deeltje in de magnetische afbuig- en focusseervelden te hebben bestudeerd, waarbij we de versnelling buiten beschouwing konden laten, gaan we nu over tot de verschijnselen die direct samenhangen met de versnelling.

We nemen voorlopig aan dat de frequentie van de versnellende spanning ideaal is aangepast aan het magneetveld (volgens de verg. 7 en 8). Dan kan men een ideaal, „synchroon", deeltje beschouwen, dat zich op de nominale baan met nominale snelheid beweegt en de versnellingsspleet altijd bij dezelfde faze van de versnellende spanning passeert (P_1, P_2, ... of P_1', P_2', ... in *fig. 16*). Als M het aantal trilholtes is (of, bij trilholtes met verscheidene spleten: het totaal aantal spleten), V_m de amplitude van de spanning, en φ de faze daarvan als een deeltje de spleet passeert ($\varphi = 0$ bij de topspanning), dan is de toeneming van de deeltjes-

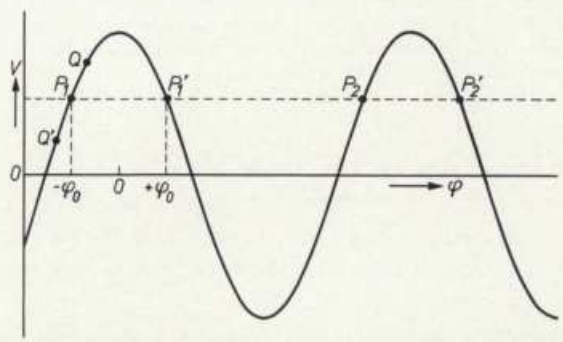


Fig. 16. De versnellende spanning V in een spleet als functie van de fazehoek φ (of van de tijd t, aangezien $\varphi = 2\pi f_a t$ + const.). P_1, P_2, ... en P_1', P_2', ... zijn „synchrone punten". Zijn van een deeltje de straal en de energie nominaal als het zich in Q of Q' bevindt, dan oscilleert het om P_1 indien $\Delta f/\Delta E$ positief is, d.w.z. indien de nominale energie kleiner dan de overgangsenergie is.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

energie per omloop $eMV_m \cos \varphi$. Dit moet gelijk zijn aan de energietoeneming die vereist is om het deeltje op de nominale baan te houden in het toenemende magneetveld. Deze toeneming is $\dot{E}/f$, waarbij E samenhangt met B volgens (4) en (5). Maakt men nog gebruik van (1), (2) en (6), dan vindt men:

$$MV_m \cos \varphi_0 = 2\pi R_Q \dot{B}. \quad . \quad . \quad . \quad (22)$$

Dit is een relatie die de „synchrone faze" φ_0 bepaalt indien $\dot{B}$ en V_m gegeven zijn.

Wat is nu het gedrag van een deeltje dat lichtelijk in faze of in energie afwijkt van het synchrone deeltje? Vertoont een deeltje een afwijking in *energie*, dan zullen de corresponderende straal van de evenwichtsbaan en de omloopfrequentie ook van de synchrone waarden afwijken. Door differentiatie van (1) en (2) en onder gebruikmaking van (14) vindt men dat ΔE, Δv, Δp en ΔR samenhangen volgens:

$$\Delta E/E_0 = \beta^2\gamma^2 \Delta v/v_0 = \beta^2 \Delta p/p_0 = (\beta^2/\alpha)\Delta R/R_0. \quad . \quad . \quad . \quad (23)$$

Differentiatie van (6) levert:

$$\Delta f/f_0 = \Delta v/v_0 - \Delta R/R_0, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (24a)$$

of, door combinatie met (23):

$$\Delta f/f_0 = (E_t^2/E_0^2 - 1)\,(\alpha/\beta^2)\Delta E/E_0, \quad . \quad (24b)$$

waarin

$$E_t = mc^2/\sqrt{\alpha} = \nu_H mc^2. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (25)$$

De kinetische energie die met E_t correspondeert is:

$$T_t = (\nu_H - 1)mc^2. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (26)$$

Uit (26) volgt voor een CG-versneller: $T_t < 0$ (want $\nu < 1$), zodat E_t en T_t van geen fysische betekenis zijn. In een AG-versneller daarentegen zijn E_t en T_t een kritieke totale en kinetische energie die gedurende de versnelling inderdaad worden bereikt; E_t heet de totale en T_t de kinetische *overgangsenergie* („transition energy"). Zoals wij dadelijk zullen zien, zijn E_t en T_t zeer belangrijke constanten voor AG-versnellers.

In de eerste plaats volgt uit verg. (24b) dat $\Delta f/\Delta E$ van teken verandert als E_0 de waarde E_t passeert. Een deeltje dat meer energie heeft dan het synchrone deeltje ($\Delta E > 0$), zal vóór de overgang ($E_0 < E_t$) sneller een omloop volbrengen dan het synchrone deeltje ($\Delta f > 0$), maar ná de overgang ($E_0 > E_t$) langzamer ($\Delta f < 0$). Dit kan worden toegelicht door verg. (24a) te beschouwen, daarbij bedenkend dat een teveel aan energie altijd een grotere evenwichtsbaan impliceert ($\Delta R/\Delta E > 0$, verg. 23). Als de energieën nog voldoende klein zijn, impliceert het teveel aan impuls een relatief grote snelheid, die de extra-weglengte die het deeltje moet afleggen meer dan compenseert, hetgeen resulteert in een hogere omloopfrequentie; bij grote energieën daarentegen, waarbij de deeltjessnelheid dicht bij de lichtsnelheid ligt, impliceert het teveel aan impuls niet meer een teveel aan snelheid: in verg. (1) is het de toeneming van γ, en niet meer die van β, die het zwaarst weegt, en de grotere baan leidt tot een lagere omloopfrequentie.

Vervolgens gaan wij na wat er gebeurt als een deeltje in *faze* afwijkt van het synchrone deeltje. We nemen eerst het geval $E_0 < E_t$, $\Delta f/\Delta E > 0$, en beschouwen een deeltje op de nominale baan met nominale energie, dat te laat in de spleet aankomt (Q bij P_1 in fig. 16). Na passeren van de spleet is ΔE van het deeltje positief (daar $V_Q > V_P$) en dus Δf eveneens; bijgevolg komt het deeltje iets minder te laat in de volgende spleet aan. Na een aantal spleten zal het op tijd aankomen. Inmiddels heeft het een teveel aan energie opgezameld, en Δf is nog steeds positief. Het zal derhalve steeds vroeger aankomen, maar, aangezien van nu af aan de spanning kleiner is dan V_P, neemt het minder energie op dan het nominale deeltje, het teveel aan energie wordt opgebruikt, totdat, laten we zeggen in Q', de energie, de straal en de frequentie weer nominaal zijn. Aangezien het deeltje nu te vroeg is, herhaalt het proces zich in de omgekeerde richting. Zo ziet men dat de deeltjes oscillaties in faze, energie en straal uitvoeren om de synchrone waarden. Dit zijn de zg. synchrotron-oscillaties. De afwijkingen in energie en straal, ΔE en ΔR, zijn 90° uit faze met $\Delta\varphi$, en derhalve in faze met $\mathrm{d}\Delta\varphi/\mathrm{d}t$. Men ziet dus dat er, zolang $E_0 < E_t$ is, een gebied van stabiele fazen bestaat, waarvan het centrum op de *stijgende* helling ligt. Deeltjes binnen dit gebied noemt men *in faze gefocusseerd*; alle deeltjes daarbuiten belanden uiteindelijk op de vacuümkamerwand en zijn verloren. Is anderzijds $E_0 > E_t$, dan ligt het centrum van het stabiele gebied op de *dalende* helling.

In een *zwak focusserende versneller* is $\alpha > 1$, dus $E_t < mc^2$, zodat bij elke deeltjesenergie E_0 geldt $E_0 > E_t$. Derhalve kunnen in het hele energiegebied dat gedurende de versnelling wordt doorlopen deeltjes stabiel worden versneld in een fazegebied op de dalende helling.

In een *sterk focusserende versneller* is $\alpha < 1$, dus $E_t > mc^2$. We moeten nu onderscheid maken tussen het energiegebied vóór de overgang en dat ná de overgang. Stabiele versnelling is vóór de overgang alleen mogelijk in een fazegebied op de stijgende helling, en na de overgang alleen op de dalende helling. Daarom moet men de versnellende spanning, op het tijdstip dat E_0 de overgangsenergie passeert, *een fazesprong van* $2\varphi_0$ *laten maken* (*fig. 17*). De versnelde deeltjes die zich vóór de overgang op de stijgende helling bevinden, zullen na deze fazesprong zich op de dalende helling bevinden, zodat zij verder kunnen worden versneld tot

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

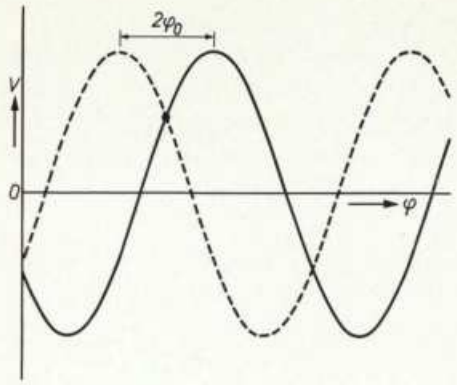


Fig. 17. In een sterk focusserende versneller laat men de h.f. spanning V een fazesprong van $2\varphi_0$ maken bij de overgangsenergie. Getrokken kromme: vóór de overgang; gestreept: na de overgang.

energieën boven E_t.

De overgang is een zeer kritiek punt in het versnellingsproces, en het was voor de bouwers van de eerste AG-synchrotrons een spannende vraag of het werkelijk mogelijk zou zijn deze manoeuvre goed te volbrengen. Op 24 november 1959 werd die vraag bevestigend beantwoord toen de protonen in de CERN-machine voor het eerst de barrière van de overgangsenergie doorbraken, tot grote opluchting van alle betrokkenen — ook aan de andere kant van de Atlantische Oceaan.

Men kan algemeen stellen dat het overgangsverschijnsel, dat een fazesprong gedurende de versnelling nodig maakt, dan en slechts dan optreedt als $mc^2 < E_t < E_f$, dat wil zeggen als

$$1 < \nu < \gamma_f, \qquad \ldots\ldots \quad (27)$$

waarin γ_f de γ-waarde is van de deeltjes bij het einde van de versnelling.

In de CPS is de overgangsenergie E_t gelijk aan $6{,}25 \times 0{,}938 \approx 5{,}8$ GeV ($T_t \approx 4{,}9$ GeV). De snelheid $\dot{B}$ waarmee de inductie toeneemt is gewoonlijk constant, en aan V_m wordt gewoonlijk een zodanige waarde gegeven dat, volgens verg. (22), de synchrone faze φ_0 ongeveer gelijk is aan $\pm \pi/3$.

De synchrotron-oscillaties nemen horizontale ruimte in beslag ten gevolge van de ermee gepaard gaande variaties in de straal van de evenwichtsbaan. Deze ruimte moet nog opgeteld worden bij de ruimte die nodig is voor betatron-oscillaties. Volgens een theoretische schatting geldt b.v. voor de CPS, ergens in het midden van de cyclus en ver van de overgang, $\Delta E/E \approx 10^{-3}$ en $2\Delta R \approx 6$ mm.

De frequentie en de variatie in amplitude van de synchrotron-oscillaties

In een „lineaire" benadering, d.w.z. voor kleine amplitude, geldt voor de frequentie f_s van de synchrotron-oscillaties:

$$f_s = f \sqrt{\frac{h}{2\pi} \operatorname{tg} \varphi_0 \left(\frac{1}{\gamma^2} - \frac{1}{\nu^2}\right) \dot{B}/Bf} \quad \ldots \quad (28)$$

(voor f en h, zie de verg. 7 en 8). Uit verg. (28) blijkt nogmaals de noodzaak voor een fazesprong in de versnellende spanning bij de overgangsenergie: als $1/\gamma^2 - 1/\nu^2$ van teken omkeert moet $\operatorname{tg} \varphi_0$ ook van teken omkeren om de frequentie reëel, dat wil zeggen de versnelling stabiel te houden.

In verg. (28) is $\dot{B}/Bf$ de relatieve toeneming van het magneetveld per omloop van het deeltje; deze is $\ll 1$. In orde van grootte geldt (ergens in het midden van de cyclus): $\dot{B}/B \approx 1\ s^{-1}$, $f \approx c/2\pi R \approx 3 \times 10^8/2\pi \times 100 \approx 10^6\ s^{-1}$, zodat $\dot{B}/Bf \approx 10^{-6}$. Daar $h/2\pi$ en $|\operatorname{tg} \varphi_0|$ van de orde van 1 zijn, en $|1/\gamma^2 - 1/\nu^2|$ ver van de overgang ongeveer 1 is (vóór de overgang) of $1/\nu^2$ (na de overgang), vinden we $f_s/f \approx 10^{-3}$ of $10^{-3}/\nu$. De frequentie van de synchrotron-oscillaties is derhalve veel kleiner dan de omloopfrequentie f (en zowel bij AG- als bij CG-versnellers, ook veel kleiner dan de betatronfrequentie νf). Men ziet dat f_s in het kHz-gebied ligt (ver van de injectie en de overgang).

Evenals bij de betatron-oscillaties, verandert de frequentie van de synchrotron-oscillaties gedurende de versnelling, en de amplitudes van $\Delta\varphi$, ΔR, ΔE en Δf variëren eveneens. Het is natuurlijk uiterst belangrijk of de amplitudes, speciaal die van $\Delta\varphi$ en ΔR, af- of toenemen. In de lineaire benadering variëren de amplitu-

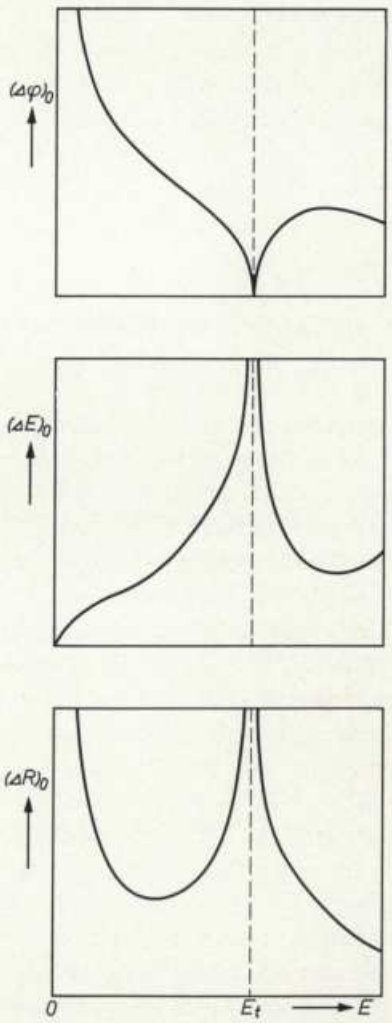


Fig. 18. De variatie van de amplitudes $(\Delta\varphi)_0$, $(\Delta E)_0$ en $(\Delta R)_0$ van de synchrotron-oscillaties met de energie, volgens de „lineaire benadering". E_t overgangsenergie.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

des, bij constante $\dot{B}$ en een ideale (ogenblikkelijke) fazesprong bij de overgang, als volgt:

$$(\Delta\varphi)_0 \sim (|1/\gamma^2 - 1/\nu^2|/\beta^2\gamma)^{1/4}, \quad . \ . \ . \quad (29a)$$

$$(\Delta E)_0 \sim (|1/\gamma^2 - 1/\nu^2|/\beta^2\gamma)^{-1/4}, \quad . \ . \ . \quad (29b)$$

$$(\Delta R)_0 \sim (\beta^6\gamma^3|1/\gamma^2 - 1/\nu^2|)^{-1/4}. \quad . \ . \ . \quad (29c)$$

Deze variaties van de amplitudes als functies van de energie zijn in *fig. 18* geschetst. Men ziet dat de variatie van $(\Delta\varphi)_0$ bevredigend is: $(\Delta\varphi)_0$ gaat naar nul voor $E \to E_t$, en nadert vervolgens, na een aanvankelijke toeneming, weer de waarde nul voor $E \to \infty$. De variatie van $(\Delta R)_0$ is veel minder bevredigend, ja zelfs verontrustend: na een aanvankelijke afneming gaat $(\Delta R)_0$ naar oneindig voor $E \to E_t$, zodat men zou moeten verwachten dat alle deeltjes bij de overgang op de vacuümkamerwand terecht komen! Gelukkig verliezen bij de overgang de verg. (29) hun geldigheid ten gevolge van het falen van de lineaire benadering. Bovendien verloopt dit groeiproces van ΔR bij de overgang slechts langzaam doordat de synchrotronfrequentie daar naar nul gaat. De ervaring leert dat de amplitude van ΔR binnen redelijke grenzen blijft als de fazesprong bij de overgang goed wordt uitgevoerd.

De synchrotron-oscillaties in de longitudinale fazeruimte; „h.f.-lussen"

Evenals de transversale fazeruimte bij de betatron-oscillaties, is de „longitudinale fazeruimte" (*fig. 19a*) een geschikt hulpmiddel om de synchrotron-oscillaties te beschrijven. Hierin is de abscis de faze φ, en de ordinaat de afwijking ΔE van de synchrone energie. (Voor de abscis kan men ook t of s gebruiken, die, afgezien van langzaam variërende constanten, evenredig zijn met φ. Evenzo kan men voor de ordinaat ook de afwijking ΔR van de straal van de nominale baan gebruiken, of ook $\mathrm{d}\Delta\varphi/\mathrm{d}t$.) Voor kleine afwijkingen van de synchrone waarden gedraagt het deeltje zich als een harmonische oscillator; in de longitudinale fazeruimte beschrijft het dan een ellips. Voor grotere afwijkingen geldt dit niet meer. In fig. 19*a* zijn enkele fazebanen geschetst. Een daarvan is een kritieke fazebaan, de *separatrix S*. In de gearceerde zone binnen de separatrix zijn de fazebanen gesloten en is de versnelling stabiel. Een synchrotronperiode is een omloop in deze ruimte om het stabiele synchrone punt. De deeltjes buiten de lus van de separatrix gaan verloren.

Een deeltje dat zich bij een zekere spleet binnen de lus van de separatrix bevindt, zal zich, daar het stabiel is, weer binnen een separatrixlus bevinden in de volgende spleet. Men heeft als het ware een reeks separatrices („r.f. buckets", „h.f.-lussen"), die langs de ring circuleren, en waarin de deeltjes worden gevangen. Er zijn h van deze lussen in de ring. De deeltjes die bij injectie binnen een h.f.-lus vallen worden „geaccepteerd" voor de versnelling: de lussen bij de injectie vertegenwoordigen een „longitudinale acceptantie". Speciaal de relatieve lus*hoogte*, $2\Delta E_m/E_0$ (voor ΔE_m zie fig. 19*a*), is een belangrijke grootheid bij het overbrengen van deeltjes van een versneller naar een andere (in casu van de voorversneller naar het synchrotron).

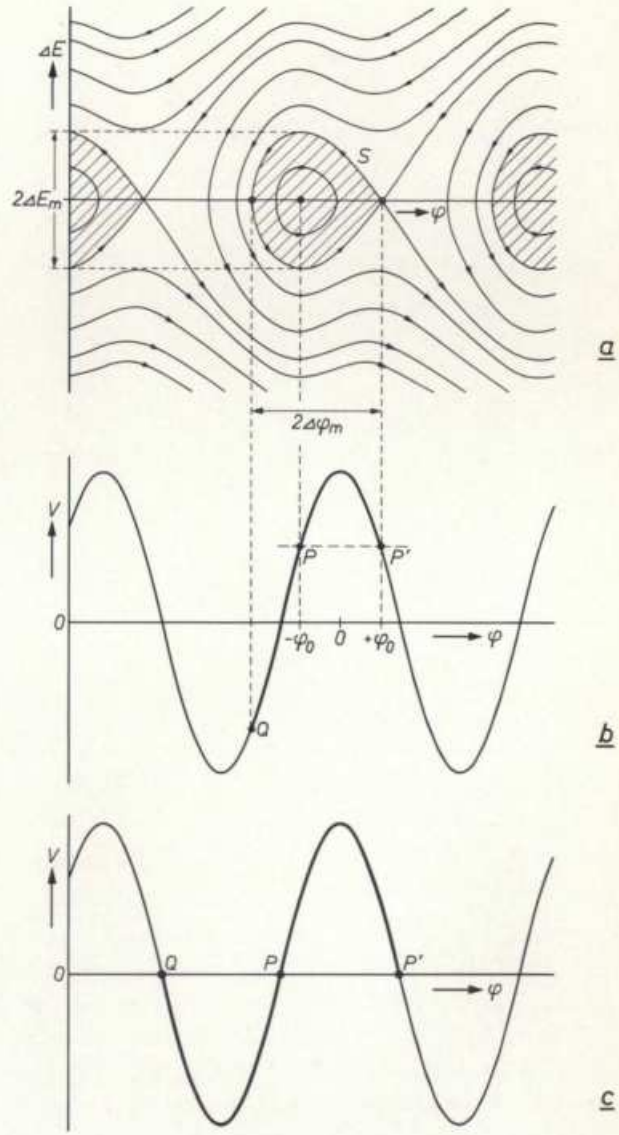


Fig. 19. *a*) Fazebanen in de longitudinale fazeruimte. Alleen deeltjes binnen de „h.f.-lus", d.i. in het gearceerde stuk binnen de „separatrix" S, zijn stabiel. $2\Delta\varphi_m$ luslengte, $2\Delta E_m$ lushoogte. De tekening geldt voor het geval dat $-\varphi_0$ de stabiele en $+\varphi_0$ de onstabiele synchrone fazehoek is (dus voor sterke focussering vóór de overgang, $E_0 < E_t$). *b*) De spleetspanning V als functie van de fazehoek φ. De luslengte $2\Delta\varphi_m$ is $\varphi(P') - \varphi(Q)$. Een deeltje dat in Q met nominale energie begint, komt in P' met nominale energie aan. Als $PP' = 0$ ($\varphi_0 = 0$), dan is $2\Delta\varphi_m = 0$. *c*) Als $\varphi_0 = \pi/2$, dan is $2\Delta\varphi_m = 2\pi$ (maar de versnelling is nul).

Bij injectie moet de lus*oppervlakte* zo groot mogelijk zijn. Om een ruwe schatting van de lus*lengte* $2\Delta\varphi_m$ te maken, beschouwen we de fig. 19*a* en *b*. De luslengte is $\varphi(P') - \varphi(Q)$, waarin P' een *onstabiel* synchroon punt is (P is een stabiel synchroon punt); Q is zodanig dat een deeltje dat in Q met nominale energie begint, in P' met nominale energie aankomt. Een deeltje met nominale energie juist rechts van Q gaat om P oscilleren; een deeltje juist links van Q schiet voorbij P' en gaat verloren. Het is nu duidelijk dat $2\Delta\varphi_m = 0$ indien $\varphi_0 = 0$ (d.w.z. P' valt samen met P), en dat

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

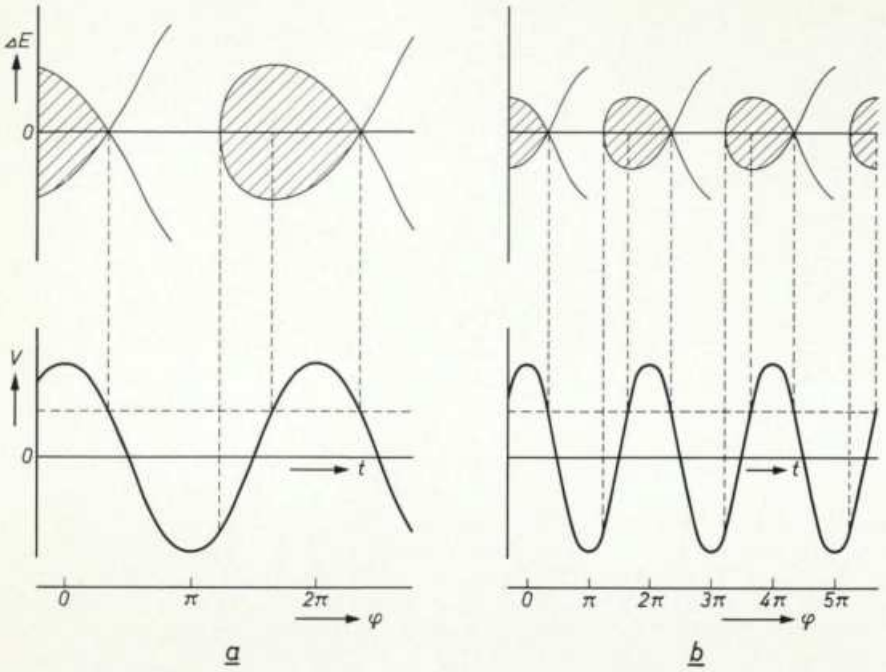


Fig. 20. Spleetspanning V en h.f.-lussen bij twee waarden van de frequentieverhouding $h = f_a/f$, schematisch. In (*b*) is h tweemaal zo groot als in (*a*). Onderaan zijn voor beide gevallen de waarden van de fazehoek $\varphi = 2\pi hft + \text{const.}$ aangegeven.

$2\Delta\varphi_m = 2\pi$ indien $\varphi_0 = \pi/2$ (wegens de symmetrie, zie fig. 19*c*). In het laatste geval is de lengte weliswaar maximaal, maar de versnelling is nul. Gebruik makend van verg. (22), zien we dat $2\Delta\varphi_m$ afneemt van 2π tot 0 als $\dot{B}/V_m$ toeneemt van 0 ($\varphi_0 = \pi/2$) tot $M/2\pi R\varrho$ ($\varphi_0 = 0$). Voor de gebruikelijke waarde $\varphi_0 = \pi/3$ blijkt de luslengte gelijk aan π te zijn. Men kan aantonen dat de lushoogte eveneens afneemt bij toenemende $\dot{B}/V_m$. *Derhalve zijn bij injectie kleine waarden van $\dot{B}/V_m$ gunstig: dit brengt een grote lusoppervlakte met zich mee.*

Een volgend interessant punt is de invloed van h op de grootte van de lus. De luslengte, in faze gemeten, hangt niet sterk van h af (zie *fig. 20*). Als men h nu b.v. tweemaal zo groot maakt, dan wordt, in tijd of in lengte langs de omtrek gemeten, de luslengte ruwweg gehalveerd, maar er zijn dan ook tweemaal zoveel lussen. De enige belangrijke factor is derhalve de afneming in lushoogte. Deze blijkt evenredig te zijn met $h^{-1/2}$. Dit is een van de overwegingen die bij de keuze van h een rol spelen.

Na een aantal omlopen na injectie zijn de onstabiele deeltjes verdwenen, en de stabiele deeltjes zijn gegroepeerd in h pakketten die in de ring rondlopen (*fig. 21*). Bij injectie vullen deze pakketten de lussen volledig en hebben dus een lengte $2\Delta\varphi_m$. Voor $2\Delta\varphi_m = \pi$ (corresponderende met $\varphi_0 = \pi/3$), nemen zij de helft van de omtrek in beslag. Gedurende de versnelling krimpen de pakketten in lengte volgens fig. 18.

Ruimteladingseffecten

Bij een grote bundelintensiteit, of liever: bij een grote protonendichtheid in de pakketten, moet men met name rekening houden met de twee volgende effecten van de Coulomb-afstoting tussen de protonen:

a) De Coulomb-afstoting werkt de focusserende krachten van de magneet in de transversale richting tegen. Hierdoor verandert de waarde van ν, en als ν in een nabij gelegen resonantie terechtkomt, heeft dit een ernstig verlies van deeltjes ten gevolge. De verandering van ν is evenredig met $\beta^{-2}\gamma^{-3}$ en kan derhalve worden beperkt door de injectie-energie hoog genoeg te kiezen.

b) De oppervlakte van de h.f.-lussen in de longitudinale fazeruimte wordt gereduceerd.

Regeling van de frequentie van de spleetspanning

Bij een gegeven programma van het magneetveld moet men de frequentie van de spleetspanning nauwkeurig gelijk houden aan h maal de frequentie die volgens (7) door het magneetveld wordt bepaald. (Zoals reeds eerder werd aangestipt, is de amplitude, die volgens verg. (22) constant zou moeten zijn als $\dot{B}$ constant is, niet bijzonder kritiek; een kleine verandering van de

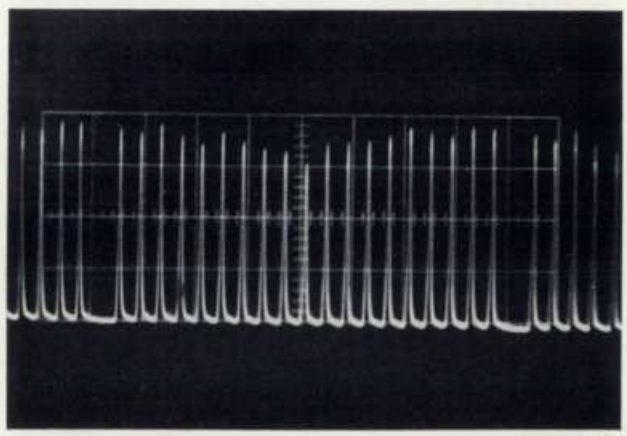


Foto CERN

Fig. 21. De pieken in dit oscillogram vertegenwoordigen protonenpakketten. Oorspronkelijk waren er 20 pakketten ($h = 20$), 105 ns uit elkaar, maar één van de pakketten is voor experimenteel gebruik geëxtraheerd, en de corresponderende piek ontbreekt.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

amplitude heeft alleen een kleine verandering van de synchrone faze φ_0 tot gevolg, hetgeen niet desastreus is.) Om de frequentie het magneetveld te doen volgen, zou men een schakeling kunnen toepassen die verg. (7) nabootst. In de praktijk is het echter niet mogelijk hiermee de vereiste precisie te bereiken. Men past derhalve een terugkoppeling toe, die de wisselspanning in faze vastkoppelt aan de beweging van de protonenpakketten, zodra deze gevormd zijn.

Ter verkrijging van een stabiele bundel is het echter niet voldoende de spanning met de beweging van de pakketten te synchroniseren; de bundel zou dan immers nog de mogelijkheid hebben naburige, steeds verder van de nominale baan afwijkende, evenwichtsbanen te gaan beschrijven, waarbij de spanning de daarbij optredende frequentieverschuiving automatisch zou volgen. Om dit te voorkomen, gebruikt men ook nog een „radiale" terugkoppeling, die een radiale afwijking van de bundel vertaalt in een relatieve fazeverschuiving van de spanning; hierdoor wordt de versnelling bijgeregeld en de energie (en daardoor de straal van de baan) gecorrigeerd.

Er zijn twee methodes in gebruik om de spleetspanning met de pakketten te synchroniseren. Bij de eerste laat men de frequentie van de spanning het magneetveld volgen met een schakeling die verg. (7) nabootst, en corrigeert vervolgens de daarbij optredende afwijkingen met een terugkoppelkring die voor de echte synchronisatie zorgdraagt. Bij de tweede maakt men gebruik van een in zichzelf gesloten kring, waarbij men een signaal dat van de pakketten wordt afgeleid gebruikt om de spanning over de spleet te genereren, die op zijn beurt weer de pakketten genereert (Engels „boot-strapping"). De ervaring leert dat beide methodes bevredigend werken. In beide gevallen is er natuurlijk een korte periode na injectie waarin de pakketten nog niet goed gevormd zijn. In die periode moet men altijd de spanning genereren met een schakeling die verg. (7) imiteert.

In *fig. 22* worden de twee methodes aan de hand van twee blokschema's geïllustreerd. In fig. 22*a* wordt in G_1 een signaal gegenereerd met een frequentie die de inductie B volgens verg. (7) volgt. Is de frequentie (f_p) niet precies gelijk aan de frequentie waarmee de pakketten in de bundel b de cilindrische elektrode P_φ passeren, dan wordt deze tot $f_p + \varepsilon$ gecorrigeerd door de frequentie-correctieschakeling F, voordat het signaal wordt toegevoerd aan de vermogensversterker A; de uitgang van A is met de trilholtespleet g verbonden. De correctie ε is evenredig met het uitgangssignaal van een fazediscriminator D, die het fazeverschil tussen het signaal van P_φ en dat van de trilholte detecteert. Radiële afwijkingen van de pakketten worden gedetecteerd door de elektrode P_R (een scheef doorgesneden cilinder) en via de fazedraaier PS omgezet in een fazeverschuiving van het van de trilholte afkomstige ingangssignaal van D; dit leidt tot een extra-correctie van de frequentie. Bij de overgangsenergie wordt het signaal van P_R door de schakelaar ST_1 omgekeerd (zoals wordt vereist door de verg. 23 en 24), en de vereiste fazesprong van $2\varphi_0$ in de spanning wordt verkregen door een schakelaar ST_2 die $2\varphi_0$ bij de faze optelt. Voordat de pakketten gevormd zijn staat de schakelaar SW_1 in de onderste stand.

Fig. 22*b* illustreert de „boot-strap"-methode. Het signaal van P_φ wordt nu zelf, na verschillende bewerkingen, aan de trilholte toegevoerd. Radiële afwijkingen worden, als boven, gecorrigeerd met behulp van de elektrode P_R, en de schakelaars ST_1, ST_2 en SW_1 hebben dezelfde functie als boven. Bij de zeer snel veranderende frequentie waarmee men hier te doen heeft, is het geen

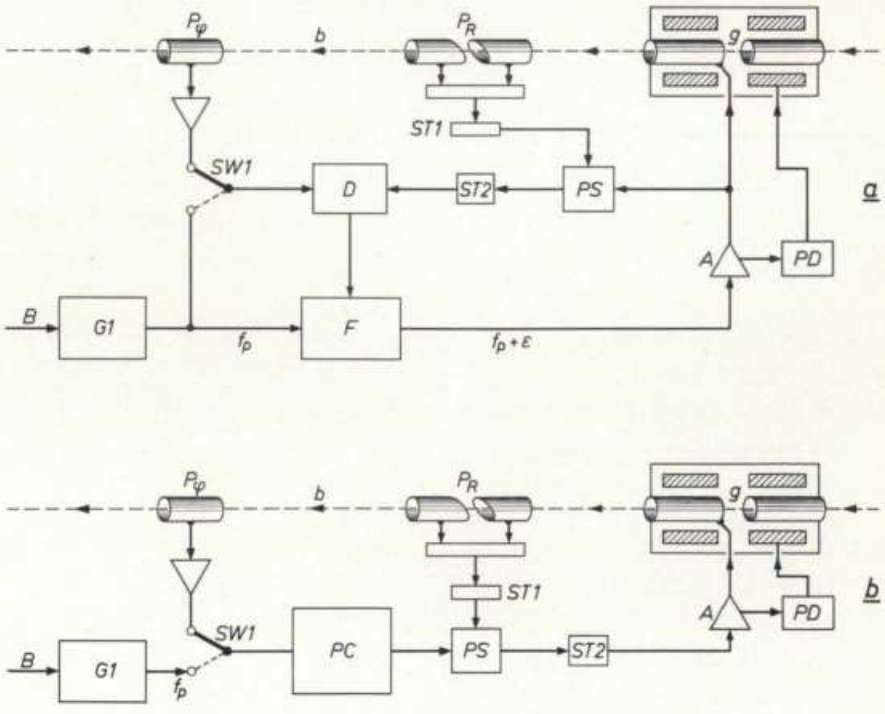
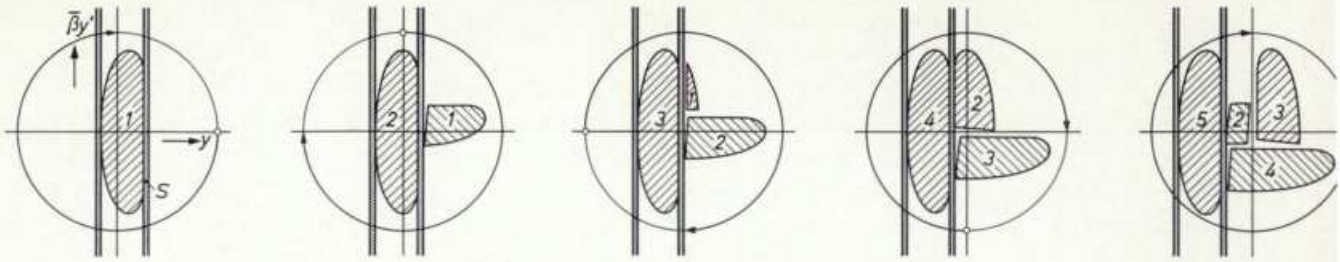


Fig. 22. Vereenvoudigde blokschema's van twee systemen voor bundelbesturing. In (*a*) wordt een signaal gegenereerd met een frequentie die volgens verg. (7) van het veld afhangt; de frequentie wordt vervolgens gecorrigeerd door van de bundelpakketten afkomstige signalen. In (*b*) wordt de spanning op de trilholtespleet direct uit de signalen van de pakketten afgeleid („boot-strapping"). Voor een verdere verklaring zie de tekst.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



eenvoudige zaak om het fazeverschil tussen de spanningen op P_φ en over de trilholtespleet op de vereiste constante waarde te houden. Daar is een hogelijk gecompliceerde multi-heterodyne apparatuur voor nodig; dit is de „schakeling voor fazevertragingscompensatie" *PC*.

In beide gevallen gebeurt het afstemmen van de trilholte op de signaalfrequentie door middel van een magneetveld dat de ferrietkern van de trilholte polariseert (zie het voorgaande artikel). Dit veld wordt verkregen met spoelen die gevoed worden door een fazedetector *PD*. Deze geeft een stroom die evenredig is met het fazeverschil tussen anode en rooster van de laatste buis van de vermogensversterker *A*; dit fazeverschil hangt direct samen met de signaalfrequentie.

Injectie

Aan het begin van de cyclus wordt een bundel protonen in de ring geïnjecteerd. Deze bundel is afkomstig van een protonenbron plus voorversneller. Om een voldoende aantal deeltjes in de ring te verkrijgen dat met succes kan worden versneld, moet enerzijds de bundel vóór injectie aan bepaalde eisen voldoen, anderzijds moet de injectie zelf zorgvuldig worden uitgevoerd. Met name moet men ervoor zorgen dat de geïnjecteerde deeltjes door de injector zelf niet worden belemmerd in hun circulatie in de ring, zoals we straks nog zullen bespreken.

De aan de te injecteren bundel gestelde eisen zijn als volgt. Om door de ring te worden geaccepteerd, moet de emittantie van de bundel binnen de synchrotron-acceptantie vallen, zowel in het horizontale als in het verticale vlak (verg. 21). In de tweede plaats moet de energiespreiding in de bundel zo klein zijn dat hij door de h.f. spanning geaccepteerd kan worden: de spreiding mag niet groter zijn dan de „lushoogte" $2\Delta E_m$ (fig. 19*a*). Vervolgens moet de dichtheid in de bundel zo groot mogelijk zijn; immers het aantal versnelde protonen dat het synchrotron per impuls levert is direct evenredig met deze dichtheid. Ten slotte moet de energie van de protonen bij injectie voldoende groot zijn.

Wat de waarde van deze energie betreft, zijn er twee condities. In de eerste plaats heeft het magneetveld een minimumwaarde, gegeven door de remanentie van het magneetstaal of door de voorwaarde dat het veld goed gedefinieerd moet zijn, d.w.z. groot vergeleken met de spreidingsvelden in de ring. Verg. (5), in combinatie met (4), leidt dan tot een minimumwaarde voor de energie. Voor de CPS b.v., met $\varrho \approx 70$ m en $B_{min} = 10$ millitesla (100 gauss), vinden we $T_{min} \approx 20$ MeV. Een tweede ondergrens voor de injectie-energie volgt uit de ruimteladingseffecten; dit verband kwam reeds eerder ter sprake (blz. 358). Deze grens is in de CPS omstreeks 50 MeV, om 10^6 protonen per cm^3 van de vacuümkamer te doen rondcirkelen.

De eigenlijke injectie

De deeltjes worden in de ring geïnjecteerd met behulp van elektrostatische of magnetische inflectoren, die een horizontaal elektrisch dan wel een verticaal magnetisch veld produceren om de deeltjes vanuit hun oorspronkelijke baan in een richting ongeveer evenwijdig aan de evenwichtsbaan in de ring te sturen (zie *fig. 23*). Het hoofdprobleem daarbij is, te voorkomen dat de deeltjes ongewenste invloed van de inflector ondergaan bij hun volgende passages. Om dit probleem op te lossen, moet men òf de inflector „terugtrekken" òf ervoor zorgen dat de deeltjes de achterkant van de inflector bij hun

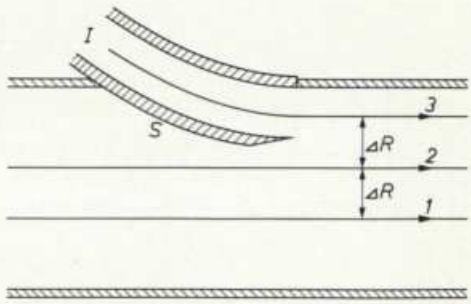


Fig. 23. Injectie in een CG-versneller. *I* inflector, *S* schot van de inflector dat de vacuümkamerruimte van het inflectorveld afschermt. Gedurende de injectie (bij versnellende spanning nul) krimpt de straal van de evenwichtsbaan met een bedrag ΔR per omloop in het toenemende magneetveld. Een deeltje dat geïnjecteerd wordt als de evenwichtsbaan in *3* is, is na de eerste omloop in *2*, en na de tweede in *1*. Verhoogt men de injectie-energie gedurende de injectie geleidelijk, zodanig dat elk geïnjecteerd deeltje de ring bij *3* binnenkomt als de corresponderende evenwichtsbaan bij *3* is, dan kan men een bundel continu injecteren, waarbij er een spiraal van deeltjes in de ring ontstaat. De nadelen van deze methode zijn: a) de grote impulsspreiding van de deeltjes in de ring na injectie, b) het grote verlies van deeltjes als, zoals gewoonlijk, ΔR aanzienlijk kleiner is dan de breedte van de bundel. Men kan de deeltjes ook bij constante energie injecteren, daarbij gebruik makende van betatron-oscillaties (zie tekst).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

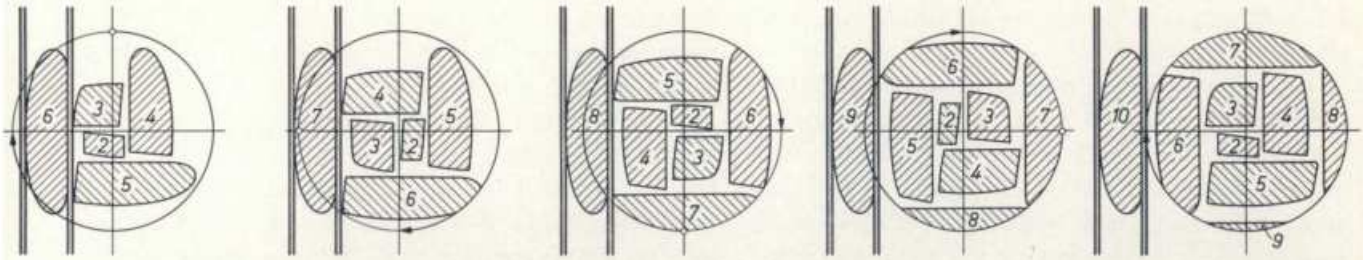


Fig. 24. Schematische voorstelling van het vullen van de horizontale acceptantie in de horizontale transversale fazeruimte van een CG-versneller (met $\nu_H = 0{,}75$) gedurende negen omlopen bij constante energie. De ordinaat is $\bar{\beta}y'$, zodat de deeltjes bij de betatron-oscillaties cirkels beschrijven (zie verg. 17 en 20). S inflectorschot (zie fig. 23). De transversale fazeruimte (y, $\bar{\beta}y'$), mèt de horizontale acceptantie (de cirkel), beweegt zich per omloop over een afstand ΔR naar rechts ten opzichte van de inflector, terwijl de geïnjecteerde deeltjes (de gearceerde stukken), per omloop in het synchrotron, 3/4 omloop in de fazeruimte maken ($\nu_H = 0{,}75$). De protonen geïnjecteerd in de eerste en de negende omloop gaan bijna geheel verloren, zodat er na injectie de protonen van omstreeks zeven omlopen in de ring over zijn.

volgende doorgang niet raken. Voor deze laatste oplossing zou men in principe gebruik kunnen maken van het feit dat, bij constante energie van de deeltjes, de evenwichtsbaan krimpt in het toenemende magneetveld (gewoonlijk wordt pas ná injectie de h.f. spanning ingeschakeld), zodat een deeltje op de evenwichtsbaan naar binnen spiraliseert. De verandering ΔR van de straal van de evenwichtsbaan per omloop wordt gegeven door:

$$\frac{\Delta R}{R} = -\alpha \frac{\dot{B}}{Bf} . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (30)$$

Bij gebruik van deze methode zouden de deeltjes geïnjecteerd moeten worden op het ogenblik dat de evenwichtsbaan samenvalt met de inflector-as (*3* in fig. 23); na één omloop zouden zij zich op baan *2* bevinden, en na twee omlopen op baan *1*. Deze methode is ongeschikt als de baankrimp ΔR kleiner is dan de bundelbreedte; immers, dan raakt een grote fractie van de deeltjes toch de achterkant van de inflector. In feite gaan de geïnjecteerde deeltjes echter betatron-oscillaties uitvoeren om de evenwichtsbaan zodra deze zich van de inflector-as verwijdert. Deeltjes die bij *3* worden geïnjecteerd (zie fig. 23) op het ogenblik dat de evenwichtsbaan bij *2* is, zullen betatron-oscillaties uitvoeren met een amplitude ΔR. Ten gevolge van het feit dat ν niet een geheel getal is, zullen ze na de eerste omloop de achterkant van de inflector niet raken. Richt men de zaak zorgvuldig in, dan zullen zij ook bij verscheidene volgende omlopen de achterkant van de inflector niet raken, zodat men op deze wijze gedurende verscheidene omlopen kan injecteren voordat de h.f. spanning wordt ingeschakeld.

Een dergelijke „multipele injectie" (multiturn injection) wordt meestal toegepast bij *CG-versnellers*. De duur van de injectie varieert daarbij van 10 tot meer dan 200 omlopen. In *fig. 24* ziet men hoe, voor een hypothetisch geval, de horizontale acceptantie van de machine in de horizontale transversale fazeruimte door de geïnjecteerde bundel in negen omlopen wordt gevuld. In deze ruimte zijn de in opeenvolgende omlopen geïnjecteerde groepen protonen spiraalachtig gerangschikt. Men kan de inflector vergelijken met een gefixeerd kanon dat op een bewegend doel schiet met kogels die betatron-oscillaties uitvoeren.

In fig. 24 is verondersteld dat de bundel in het horizontale middenvlak werd geïnjecteerd. Met behulp van injectie buiten dit vlak kan men op analoge wijze tevens gebruik maken van verticale betatron-oscillaties.

De beperking dat injectie òp de evenwichtsbaan (dus zonder van betatron-oscillaties gebruik te maken) alleen mogelijk is op één ogenblik, kan worden omzeild door de injectie-energie gedurende de injectieperiode te laten toenemen. Na injectie is de machine dan gevuld met deeltjes met verschillende impulsen op verschillende evenwichtsbanen. Ten gevolge van de impulsspreiding wordt dan echter, bij inschakeling van de h.f. spanning, slechts een fractie van de deeltjes door de h.f.-lussen geaccepteerd. Een andere mogelijkheid is de deeltjes *in* de ring gedurende de injectieperiode langzaam te versnellen. In feite zijn al deze methodes, met meer of minder succes, wel toegepast.

Bij *AG-versnellers* vormt het feit dat de impulscompactie zo sterk is een complicatie bij de injectie; immers, de kleine waarde van α betekent dat de krimp van de baan slechts gering is (verg. 30). Eén van de oplossingen voor het injectieprobleem is hier, het schot in de vacuümkamer te vermijden en een inflector te gebruiken die bestaat uit twee platen voor elektrostatische deflexie, één aan elke kant van de vacuümkamer. De werking van de inflector op de deeltjes na hun eerste omloop wordt dan geëlimineerd door het deflexieveld uit te schakelen: na één omloop wordt de inflector kortgesloten in een tijd (ongeveer 0,1 μs) die kort is vergeleken met de omloopperiode (ongeveer 7 μs), waarna men dus de protonen van één omloop in de kamer heeft.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Men heeft dan *enkelvoudige injectie* (single-turn injection).

Is de emittantie van de bundel (of van de bundelkern met grote dichtheid) veel kleiner dan de acceptantie van de versneller, dan profiteert men met enkelvoudige injectie niet ten volle van de acceptantie, en multipele injectie is dan in principe natuurlijk te prefereren. Nu kan men ook in AG-versnellers wel multipele injectie toepassen, mits men lokaal bepaalde manipulaties met de evenwichtsbaan uitvoert, in plaats van gebruik te maken van het „natuurlijke" spiraliseren ten gevolge van de baankrimp van verg. (30). Deze manipulaties worden toegelicht in *fig. 25*. Een spoel M_1 stoot een denkbeeldig deeltje dat de evenwichtsbaan C volgt in een grote betatronslingering, en een spoel M_2, die een halve betatrongolflengte van M_1 verwijderd is, stoot het

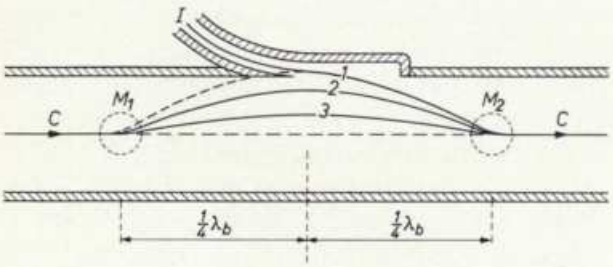


Fig. 25. Manipulatie van de evenwichtsbaan in AG-versnellers. De spoel M_1 stoot een denkbeeldig deeltje uit de evenwichtsbaan C in een betatronslinger, en de spoel M_2 stoot het terug in C. De afstand M_1M_2 is de helft van de betatrongolflengte $\lambda_b = 2\pi R/\nu$. Het resultaat is een nieuwe evenwichtsbaan met een bult. Deze laat men gedurende de injectieperiode in grootte afnemen (*1*, *2*, *3*, . . .) door de spoelstromen bij te regelen. De uitgang van de inflector ligt midden tussen M_1 en M_2.

terug in de oorspronkelijke evenwichtsbaan. Het resultaat is een nieuwe evenwichtsbaan, die een bult heeft tussen M_1 en M_2 maar die overal elders met de oorspronkelijke evenwichtsbaan samenvalt. Via de spoelstromen laat men de bult in grootte afnemen (zie *1*, *2*, *3* in fig. 25). De injectie vindt voor de rest als boven plaats. De deeltjes worden in de ring geschoten door een inflector aan de zijkant van de vacuümkamer. Bij het begin van de injectie ligt de (nieuwe) evenwichtsbaan in de inflector-as. Gedurende het slinken van de bult voeren de geïnjecteerde deeltjes betatron-oscillaties uit waarvan de amplitude gestadig toeneemt. Hierdoor is het mogelijk ervoor te zorgen dat de gedurende een aantal omlopen binnenstromende protonen de inflector niet raken en samen de synchrotron-acceptantie vullen (zie *fig. 26*).

Het vangen van de deeltjes door het h.f. veld

Na de injectie is de ring gevuld met deeltjes, corresponderend met een continu lint N in de longitudinale fazeruimte (*fig. 27a*); op dit ogenblik wordt de h.f. spanning ingeschakeld. De deeltjes die zich nu binnen de h.f.-lussen bevinden (dubbel gearceerd in fig. 27*a*) zijn „gevangen" en worden versneld tot het einde van de cyclus, de andere gaan verloren. De grootte van de lussen, dus het rendement van de vangst, wordt grotendeels bepaald door $\dot{B}/V_m$, zoals we vroeger hebben gezien (blz. 358). Voor de gebruikelijke waarde van $\dot{B}/V_m$, waarbij de synchrone fazehoek $\varphi_0 \approx \pi/3$ is, is de lus-lengte π, zodat de helft van de lengte van het lint N bruikbare deeltjes kan leveren. Wat de hoogte van de lussen betreft, kan men voor vele gevallen $2\Delta E_m/E_0$ globaal op 10^{-3} stellen; dit is dus de grens voor de toelaatbare energiespreiding in de geïnjecteerde bundel.

Het vangen van de deeltjes wordt in *fig. 28* op frappante wijze geïllustreerd.

Men tracht wel het rendement van de vangst te vergroten door bij injectie een kleinere $\dot{B}$ te gebruiken dan gedurende de versnelling. Het veranderen van $\dot{B}$ is echter een delicate zaak. Het frequentieprogramma moet deze verandering nauwkeurig volgen. Bovendien kunnen er, als de latere toeneming van $\dot{B}$ tot de normale waarde en de daarmee gepaard gaande krimp van de lussen niet voldoende langzaam gaat, deeltjes verloren gaan, doordat de h.f.-lussen kleiner worden dan de bundelpakketten in de longitudinale fazeruimte (waarvan de afmetingen gedurende de versnelling krimpen [8]).

Een andere kunstgreep om het rendement van de vangst te vergroten is bij toeval bij de CPS gevonden. Stel dat de h.f. spanning ingeschakeld wordt terwijl de terugkoppeling met de bundel uitgeschakeld is (SW_1 naar beneden in fig. 22), en wel op een enigszins verkeerde frequentie (b.v. 1,5% te laag). Het lint van protonen ligt nu in het onstabiele gebied (bij W in fig. 27*a*),

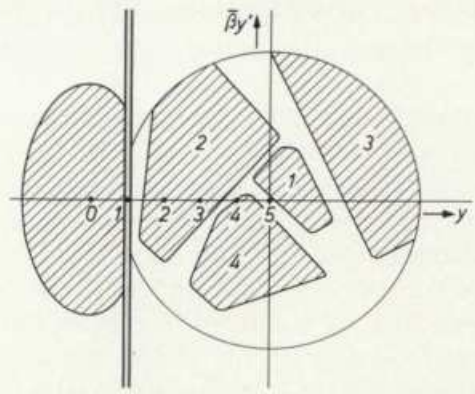


Fig. 26. Het vullen van de horizontale acceptantie van een AG-versneller (met $\nu_H = 6{,}2$) gedurende vier omlopen, bij constante energie, op soortgelijke wijze als in fig. 24. De deeltjes maken nu 6,2 omlopen in de fazeruimte bij elke omloop in de ring. Vergeleken met fig. 24 is de geïnjecteerde bundel hier relatief breder doordat q kleiner is in AG-versnellers (zie verg. 21), en minder langwerpig doordat de factor $\bar{\beta} = R_0/\nu$ kleiner is.

[8] Deze krimp wordt weergegeven door verg. (29a) op blz. 357.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

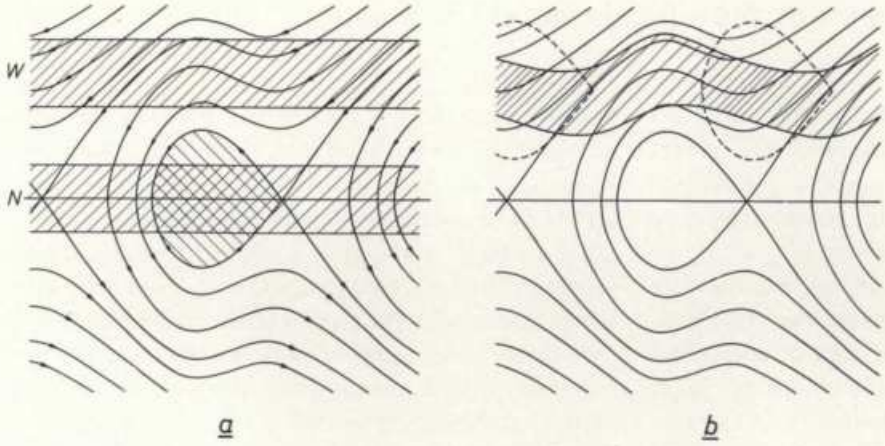


Fig. 27. *a*) Als de h.f. spanning met de nominale frequentie wordt ingeschakeld, beslaat de protonenbundel in de longitudinale fazeruimte (φ, ΔE) een centraal gelegen band N, en de deeltjes binnen de lussen (de deeltjes in het dubbel gearceerde stuk) worden gevangen, waarna de terugkoppelketen wordt gesloten. Is bij het inschakelen van de h.f. spanning de frequentie te laag, dan beslaan de protonen een *niet* centraal gelegen band, b.v. W. De deeltjes bewegen zich langs de fazebanen, en na enige tijd (*b*) ontstaan er vage pakketten. Wordt de terugkoppelketen nu gesloten, dan verplaatsen de lussen zich naar de pakketten.

en de protonen zullen zich langs de onstabiele fazebanen gaan bewegen. Daar de beweging echter niet gelijkmatig is, beginnen zich toch vagelijk pakketten te vormen en deze geven een signaal op de elektrodes. Sluit men nu na een geschikte tijd (de „take-over time", van de orde van 50 μs, een fractie van de periode van de synchrotron-oscillaties) de terugkoppelketen (schakelaar SW_1 naar boven in fig. 22), dan worden faze en frequentie van de h.f. spanning automatisch bijgeregeld en *de h.f.-lussen verplaatsen zich*, zodanig dat zij op de stukken met de grootste dichtheid terecht komen (fig. 27*b*). Met deze methode kan men een vangrendement van 70% verwachten.

De dwarsafmetingen van de bundel bij het einde van de cyclus

De verticale afmeting van de bundel wordt voornamelijk bepaald door de amplitude van de betatron-oscillaties; hij neemt dus gedurende de versnelling af, evenredig met $B^{-1/2}$. Gesteld dat na injectie de bundelemittantie de machine-acceptantie goed vult, dan verwacht men derhalve voor de verticale doorsnede van de bundel aan het einde van de versnelling:

$$W \approx 2q_v \sqrt{B_i/B_f}, \quad \ldots \quad (31)$$

waarin $2q_v$ de verticale doorsnede van de vacuümkamer is, en B_i en B_f de inducties zijn bij injectie en bij het einde van de versnelling. Ten gevolge van impulsspreiding in de geïnjecteerde bundel en synchrotron-oscillaties is de horizontale doorsnede van de bundel altijd groter dan de verticale. In de onderhavige machines is de verhouding B_f/B_i van de orde van 100, zodat men voor de eindwaarde van de bundeldoorsnede een waarde van ruwweg 1/10 van de kamerdiameter verwacht. Door dezelfde oorzaken die de werkelijke acceptantie gewoonlijk kleiner maken dan die van verg. (21) (energiespreiding, synchrotron-oscillaties, het niet uitgericht zijn van de magneten enz.) zou de doorsnede kleiner moeten worden, maar anderzijds wordt deze weer vergroot door verstrooiing door het restgas, uitdijing bij de overgangsenergie, ruimteladingseffecten, verschillende niet-lineariteiten, enz.

Foto CERN

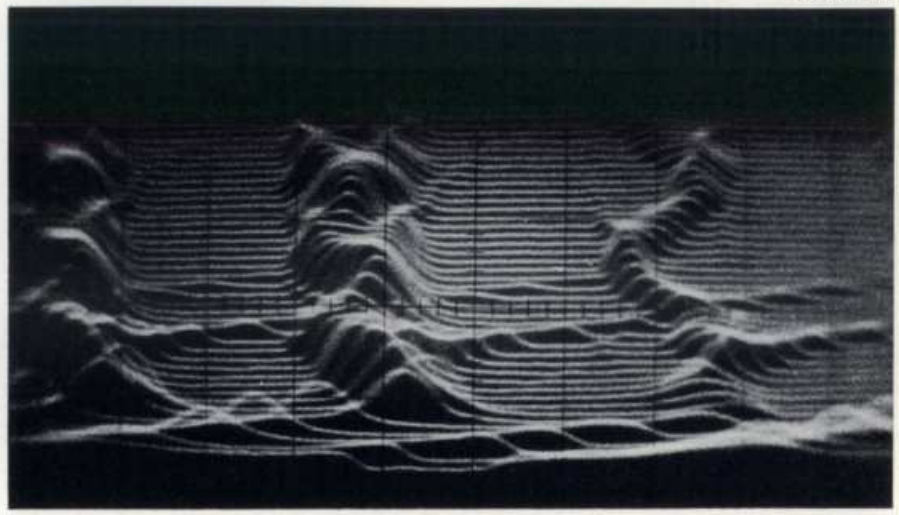


Fig. 28. Het vangen van de deeltjes door de h.f.-lussen, zichtbaar gemaakt op een oscilloscoop. Men ziet het gedrag van de bundel gedurende de eerste 40 omlopen in de machine. Het verticale signaal is dat van een elektrode in de ring; de oscilloscoop is gesynchroniseerd met de h.f. spanning. Een bult in het spoor vertegenwoordigt een pakket dat de elektrode passeert. Na elke omloop van de bundel in de ring wordt het spoor iets omhoog geschoven. Na de eerste paar omlopen beginnen zich door de spanning geïnduceerde pakketten te vormen. Na zes omlopen sluit men de terugkoppelkring, waardoor de pakketten met de h.f. spanning worden gesynchroniseerd.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

II. Gegevens betreffende de vijf versnellers

We hebben in de vorm van tabellen een aantal gegevens betreffende de vijf genoemde synchrotrons verzameld en zullen thans trachten deze zo te presenteren dat de speciale eigenaardigheden, die men bij elke machine kan vinden, duidelijk uitkomen.

Vooraf willen we er echter op wijzen dat, naast de grootheden waarvan de waarde eens en voor altijd vastligt (zoals b.v. de diameter van de ring), er allerlei belangrijke grootheden zijn die nog wel eens gewijzigd worden, aangezien de versnellertechniek nog volop in beweging is en er soms van de ene dag op de andere verbeteringsmogelijkheden beschikbaar komen. Het is dus heel wel mogelijk dat sommige gegevens, zoals b.v. die betreffende de intensiteit, het type van de ionenbron, de injectieprocedure, de verschillende regelprocedures, bij het verschijnen van dit artikel alweer enigszins achterhaald zullen zijn.

Ruwweg gesproken, is het doel van een versneller, protonen te produceren van een zo groot mogelijke kinetische energie, in zo groot mogelijke hoeveelheden, met kosten binnen acceptabele grenzen. Maar ook bij de wat kleinere energieën is de kennis van de mogelijke fysische processen nog verre van volledig, en resultaten die bij deze energieën verkregen worden kunnen eveneens van groot belang zijn voor de nucleaire wetenschap. Daar juist de zeer zeldzaam optredende verschijnselen voor de fysici vaak het interessantst zijn, wordt de vraag naar protonenbundels van grote intensiteit — waarbij immers de kans op het optreden van de zeldzame verschijnselen in een bepaald tijdvak relatief groot is — steeds groter. Van de twee nauw verweven doelstellingen: grote energie en grote intensiteit, staat de eerste voorop bij de AGS en de CPS, en de tweede bij de drie andere machines: de ZGS, Nimrod en de PPA.

Trachten we met enkele woorden het speciale karakter van elk van de machines aan te geven, dan zouden we kunnen zeggen dat de AGS en de CPS als eerste,

Foto CERN

Fig. 29. Overzicht van het CERN-protonensynchrotron, met bijbehorende gebouwen (1967).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Tabel II. Energie, magneetveld, periode en bundelintensiteit (eind 1969).

		AGS	CPS	ZGS	Nimrod	PPA
kinetische eindenergie (T_f)	in GeV	33	28	12,7	7	3
inductie van het eindmagneetveld (B_f)	in tesla [*]	1,3	1,4	2,15	1,4	1,4
intensiteit	in protonen per impuls	3×10^{12}	2×10^{12}	$3{,}3\times10^{12}$	$1{,}8\times10^{12}$	4×10^{10}
cyclusperiode [**]	in s	2,4	2,5	2,3	2,7	0,054
corresponderende gemiddelde stroom	in μA	0,20	0,1	0,23	0,11	0,12
kinetische injectie-energie (T_i)	in MeV	50	50	50	15	3,0
inductie van het injectieveld (B_i)	in millitesla	12,1	14,7	48,2	29,9	27,0

[*] 1 tesla = 10 kilogauss.
[**] Opgegeven zijn veel gebruikte waarden, maar de periode kan aanzienlijk worden gevarieerd (behalve bij de PPA).

gebruik makend van het AG-principe, en de overgangsenergie trotserend, het 30-GeV-gebied hebben bereikt; dat de ZGS een machine is met gradiënt nul, en daardoor zeer compact; dat Nimrod een enorme vacuümkamer heeft voor zeer grote intensiteiten; en dat de PPA de protonen tot grote energieën versnelt in een cyclusperiode die bijzonder kort is.

Fig. 29 is een luchtfoto van de CPS. Een indruk van de ZGS werd reeds gegeven in fig. 1, van de PPA in fig. 2, en van de AGS in fig. 3 (en in fig. 2 van het voorgaande artikel [1]). In fig. 33 ziet men de systemen voor injectie en extractie bij Nimrod.

Afmetingen, energie en magneetveld

Tabel II geeft de begin- en de eindwaarde zowel van de energie van de protonenbundel als van het magneetveld, benevens de bundelintensiteit en de cyclusperiode. De afmeting van de ring en het door de magneten in beslag genomen gedeelte daarvan worden in *tabel III* gegeven. De gegevens betreffende afmeting, energie en magneetveld zijn overzichtelijk samengevat in *fig. 30*. Hierin kan men al direct twee dingen opmerken: a) het eindveld van de ZGS is aanzienlijk sterker dan dat van de andere versnellers, hetgeen bij een gegeven eindenergie een relatief compacte machine mogelijk maakt; b) voor kleine machines, in het bijzonder voor de PPA, is (zoals we reeds vroeger zagen) de frequentiezwaai groot.

Afgezien van één geval is het eindveld B_f op de nominale baan steeds ongeveer 1,4 tesla (een waarde die bij Nimrod tot 1,6 tesla vergroot kan worden ten einde 8 GeV te kunnen bereiken). Deze waarde wordt voornamelijk daardoor bepaald dat zelfs in magneetstaal van hoge kwaliteit grote fluctu-

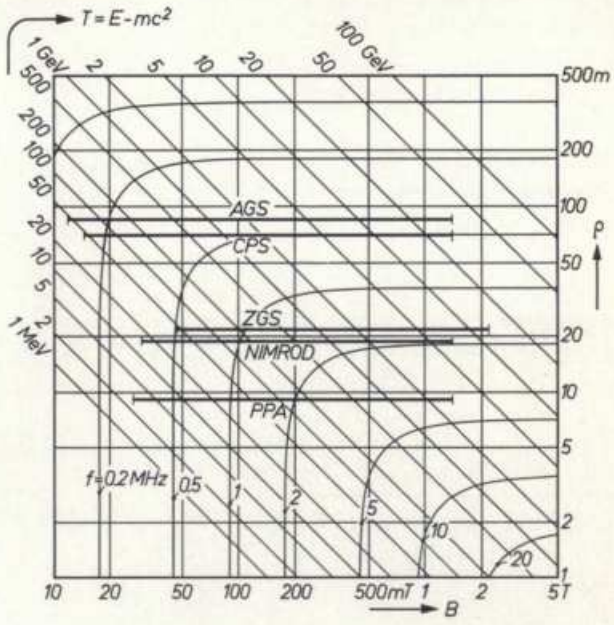


Fig. 30. De kromtestraal ϱ, de inductie B van het magneetveld en de kinetische energie T in de vijf versnellers. B is horizontaal uitgezet, ϱ verticaal, beide op logaritmische schaal. Elke versneller wordt voorgesteld door een horizontale lijn tussen het veld bij injectie en het eindveld. De lijnen van constante T zijn getekend volgens de relaties (3), (4) en (5), en de lijnen van constante omloopfrequentie f volgens verg. (6). (De waarde van f in het (B,ϱ)-diagram hangt van de waarde van ϱ/R_0 af; eenvoudigheidshalve hebben we slechts één waarde aangenomen: $\varrho/R_0 = 0{,}7$.) De bocht in de lijnen van constante frequentie markeert de overgang van „niet-relativistisch" naar „relativistisch". Uit het diagram blijkt nogmaals duidelijk dat versnelling in het niet-relativistische gebied een grote frequentiezwaai impliceert.

Tabel III. Afmetingen van de ring; magneetfractie.

		AGS	CPS	ZGS	Nimrod	PPA
omtrek ($2\pi R_0$)	in m	807	628	172	148	78,58
gemiddelde straa (R_0)	in m	128,5	100	27,4	23,6	12,51
kromtestraal (ϱ)	in m	85,37	70	20,8	18,8	9,145
magneetfractie van de ring ($\approx\varrho/R_0$)		0,63	0,68	0,76	0,80	0,731
omloopfrequentie bij snelheid c ($f_c = c/2\pi R_0$)	in MHz	0,372	0,478	1,75	2,02	3,815
gewicht van het magneetstaal	in ton	4000	3000	4700	7000	400

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

aties in het magneetveld optreden als het materiaal verzadigd wordt. Het maximale veld B_{max} dat in dit verband nog aanvaardbaar is, is gewoonlijk omstreeks 2,0 tesla. Daar aan de voorwaarde $B < B_{max}$ over de gehele dwarsdoorsnede van de vacuümkamer moet worden voldaan, moet B_f aanzienlijk kleiner blijven dan B_{max} indien het veld een gradiënt heeft. De ZGS, met gradiënt nul, vormt de uitzondering. Wij komen op dit punt nog terug bij de beschouwing van de „bruikbare doorsnede".

In tabel III ziet men dat de machines onderling niet veel verschillen wat betreft de fractie van de ring die door de magneten in beslag wordt genomen; deze is 0,7 à 0,8. De opstelling van de magneten is echter wel geheel verschillend, zoals we reeds in fig. 7 zagen.

Tabel IV. Structuur van de ring.

F: horizontaal focusserende magneet (fig. 10*b*).
D: horizontaal defocusserende magneet (fig. 10*a*).
O: recht veldvrij stuk.
O′: kort recht stuk.

AGS	D- en F-magneten, 60 periodes (FO′D)O(DO′F)O	
	144 F of D van 2,29 m	= 329,6 m
	96 F of D van 1,90 m	= 182,4 m
	240 magneten	= 512,0 m [*]
	24×O van 3,15 m	= 75,6 m
	72×O van 1,63 m	= 117,4 m
	144×O′ van 0,71 m	= 102,2 m
	$2\pi R_0$	= 807 m
	$2\pi\varrho$	= 536 m [*]
CPS	DF- en FD-eenheden, 60 periodes FDODFO	
	50 DF van 4,26 m	= 213 m
	50 FD van 4,26 m	= 213 m
	100 eenheden	= 426 m [*]
	80×O van 1,74 m	= 139,2 m
	20×O van 3,14 m	= 62,8 m
	$2\pi R_0$	= 628 m
	$2\pi\varrho$	= 440 m [*]
ZGS	Magneten met vlakke polen	
	8 octanten van 16,3 m	= 130,4 m
	8 rechte stukken, totale lengte	= 41,45 m
	$2\pi R_0$	= 172 m
	$2\pi\varrho$	= 130,4 m
Nimrod	D-magneten	
	8 octanten van 14,75 m	= 118,0 m
	8 rechte stukken, totale lengte	= 30,4 m
	$2\pi R_0$	= 148 m
	$2\pi\varrho$	= 118,0 m
PPA	D-magneten	
	16×D van 3,591 m	= 57,46 m
	8×O van 1,981 m	= 15,85 m
	8×O′ van 0,660 m	= 5,28 m
	$2\pi R_0$	= 78,58 m
	$2\pi\varrho$	= 57,46 m

[*] Het verschil tussen de totale lengte van de magneten en $2\pi\varrho$, waarin ϱ (zie tabel III) wordt bepaald door p en B (verg. 5), is het gevolg van randeffecten.

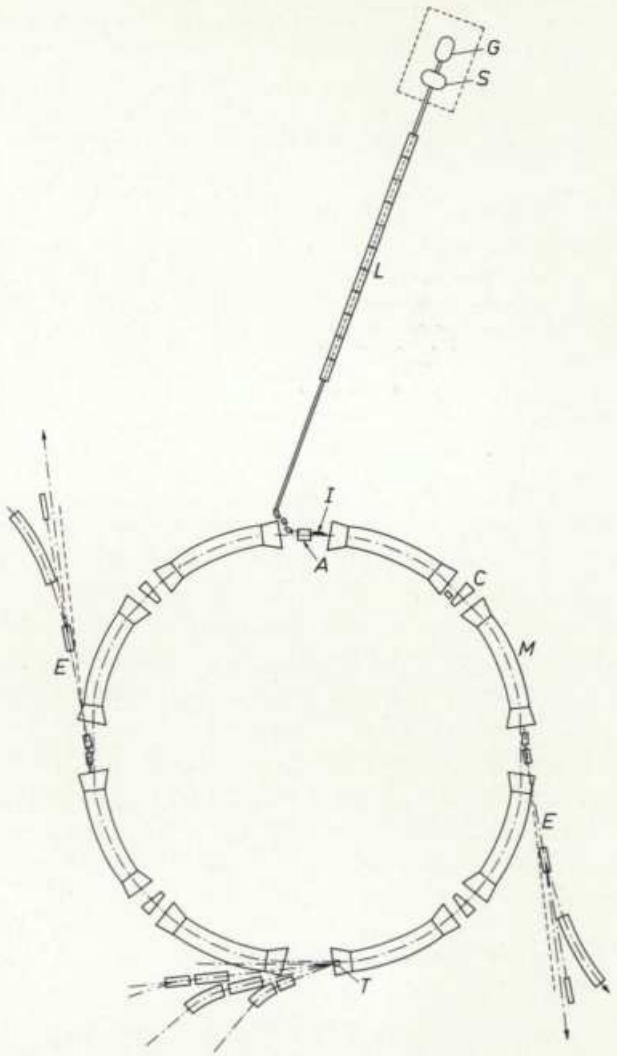


Fig. 31. Plattegrond van de ZGS. Let op de scheve eindvlakken van de magneten. *M* hoofdafbuig- en focusseermagneten. *C* correctiemagneten. *G* hoogspanningsgenerator. *S* ionenbron. *L* lineaire versneller. *I* inflector. *A* versnellingsstation. *E* geëxtraheerde bundels. *T* inwendig trefplaatje.

Enkele details betreffende deze opstelling zijn verzameld in *tabel IV*. In de AGS zijn de individuele magneten zo kort dat zij recht uitgevoerd konden worden, in alle andere machines zijn de eenheden gekromd. Met het oog op de snelle variaties van het veld zijn alle eenheden gelamelleerd.

De opstelling van de magneten bij de ZGS ziet men in *fig. 31*, en een der magneet-octanten van deze machine in *fig. 32*. Gedeelten van de magneetring van Nimrod ziet men in *fig. 33a* en *b*. Voorafgaande foto's gaven reeds een indruk van de magneeteenheden bij de andere machines (PPA, fig. 2; CPS, fig. 4; voor de AGS zie fig. 2 van het voorgaande artikel [1]).

Alle magneten hebben in dwarsdoorsnede de C-vorm, behalve de ZGS-magneet. Het construeren van een magneet van voldoende mechanische sterkte is een

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Foto Argonne National Laboratory

Fig. 32. Een magneet-octant van de ZGS in aanbouw.

probleem op zichzelf, in het bijzonder voor de zwaardere magneten (ZGS, Nimrod). Vanuit dit gezichtspunt heeft de opzet van de ZGS grote voordelen. Aan de andere kant heeft men met de C-vorm veel gemakkelijker toegang tot apparatuur in de vacuümkamer en is er geen restrictie voor geëxtraheerde en secundaire bundels, redenen waarom men bij Nimrod aan de C-vorm heeft vastgehouden (zie fig. 5).

Tabel V. Focussering.

		AGS	CPS	ZGS	Nimrod	PPA
type van de focussering		AG	AG	eindvlakken	CG	CG
eindvlakhoeken				13,26°; 9,16°		
veldindex n		$\pm$ 357	$\pm$ 288	0	0,6	0,65-0,58
ν_H		8,75	6,25	0,83	0,71	0,69-0,78
ν_V		8,75	6,25	0,81	0,87	0,94-0,87
$\alpha \approx 1/\nu_H^2$		0,013	0,026	1,7	2,0	1,84-2,10
overgangsenergie						
totaal: $E_t = \nu mc^2$	in GeV	8,2	5,8			
kinetisch: $T_t = (\nu - 1)mc^2$	in GeV	7,3	4,9			
$\bar{\beta} = R_0/\nu$	in m	14,7	16	H 33 V 24	H 33 V 27	H 18 V 14
vormfactor $F = \beta_{max}/\bar{\beta}$		1,35	1,35		1	1

Het AG- en het CG-principe; gecombineerde en gescheiden functies

In de AGS en de CPS wordt sterke focussering (een grote waarde van ν) verkregen door het AG-principe toe te passen; de andere drie machines zijn zwak focusserende machines met ν-waarden kleiner dan 1. *Tabel V* geeft de parameterwaarden aangaande de focussering.

Zoals we hierboven hebben gezien, heeft een grote waarde van ν twee voordelen: a) Het aantal deeltjes dat versneld kan worden is evenredig met $A_H A_V$, het produkt van de acceptanties ($A = \pi q^2 \nu / FR$) in het horizontale en het verticale vlak, en derhalve evenredig met $\nu_H \nu_V$. Een vergroting van de ν's leidt derhalve onmiddellijk tot de mogelijkheid bundels met grotere intensiteit te versnellen. Een vergroting van de acceptanties kan anders alleen

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

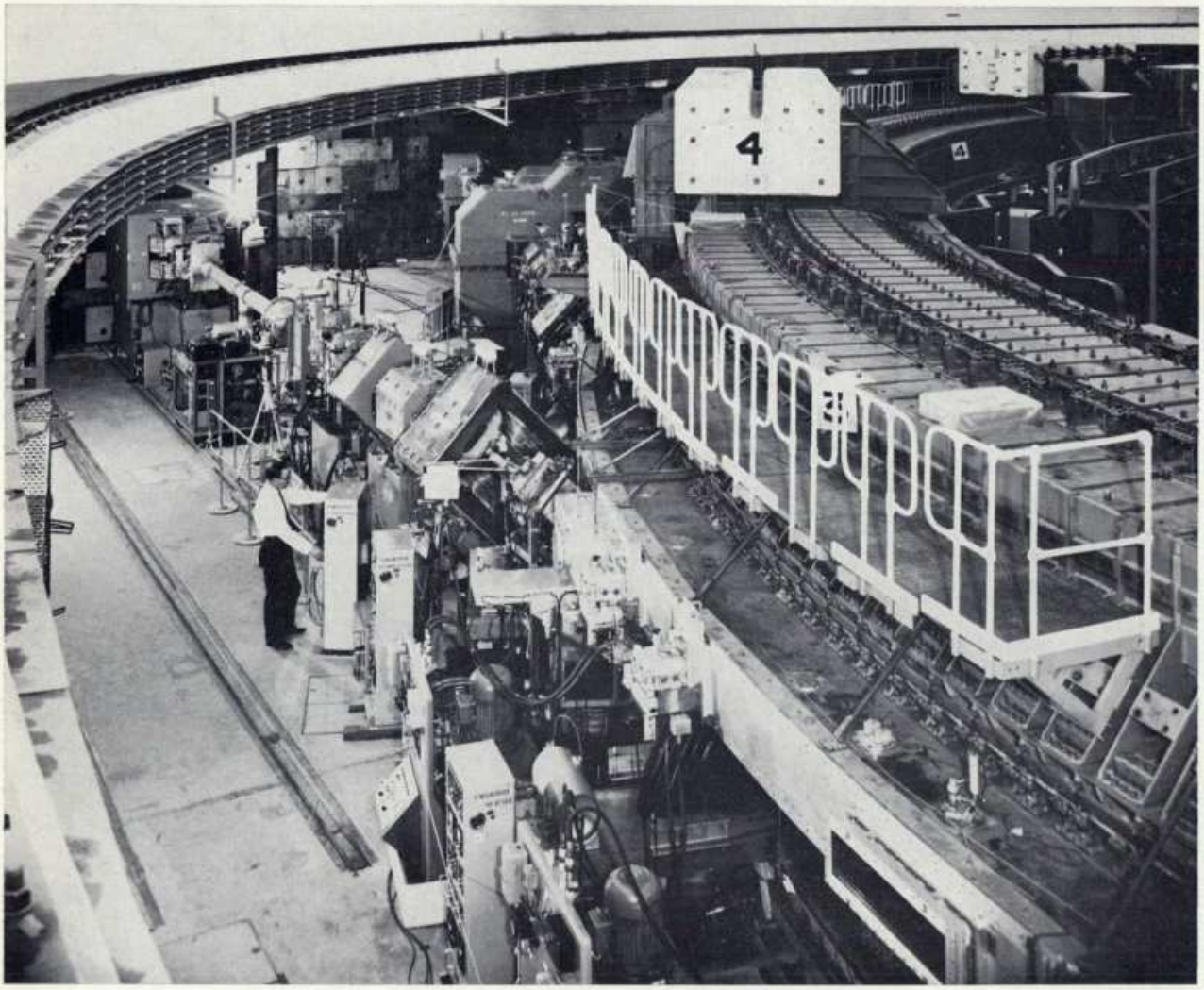


Fig. 33*a*. Een gedeelte van de magneetring van Nimrod, met voorzieningen voor extractie.

worden verkregen door vergroting van de doorsnede van de vacuümkamer, hetgeen zeer kostbaar is aangezien dit weer een evenredige vergroting van de dwarsdoorsnede van de magneet impliceert. b) Een grote ν_H gaat gepaard met een grote impulscompactie. Hebben de deeltjes in de bundel een zekere energiespreiding (ten gevolge van energiespreiding in de geïnjecteerde bundel en synchrotron-oscillaties), dan is de daarmee gepaard gaande spreiding in evenwichtsbanen klein als de impulscompactie sterk is. Uit verg. (14) vindt men, met behulp van de relaties (1) tot (4):

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{1}{\nu_H^2} \frac{\gamma}{\gamma + 1} \frac{\Delta T}{T}.$$

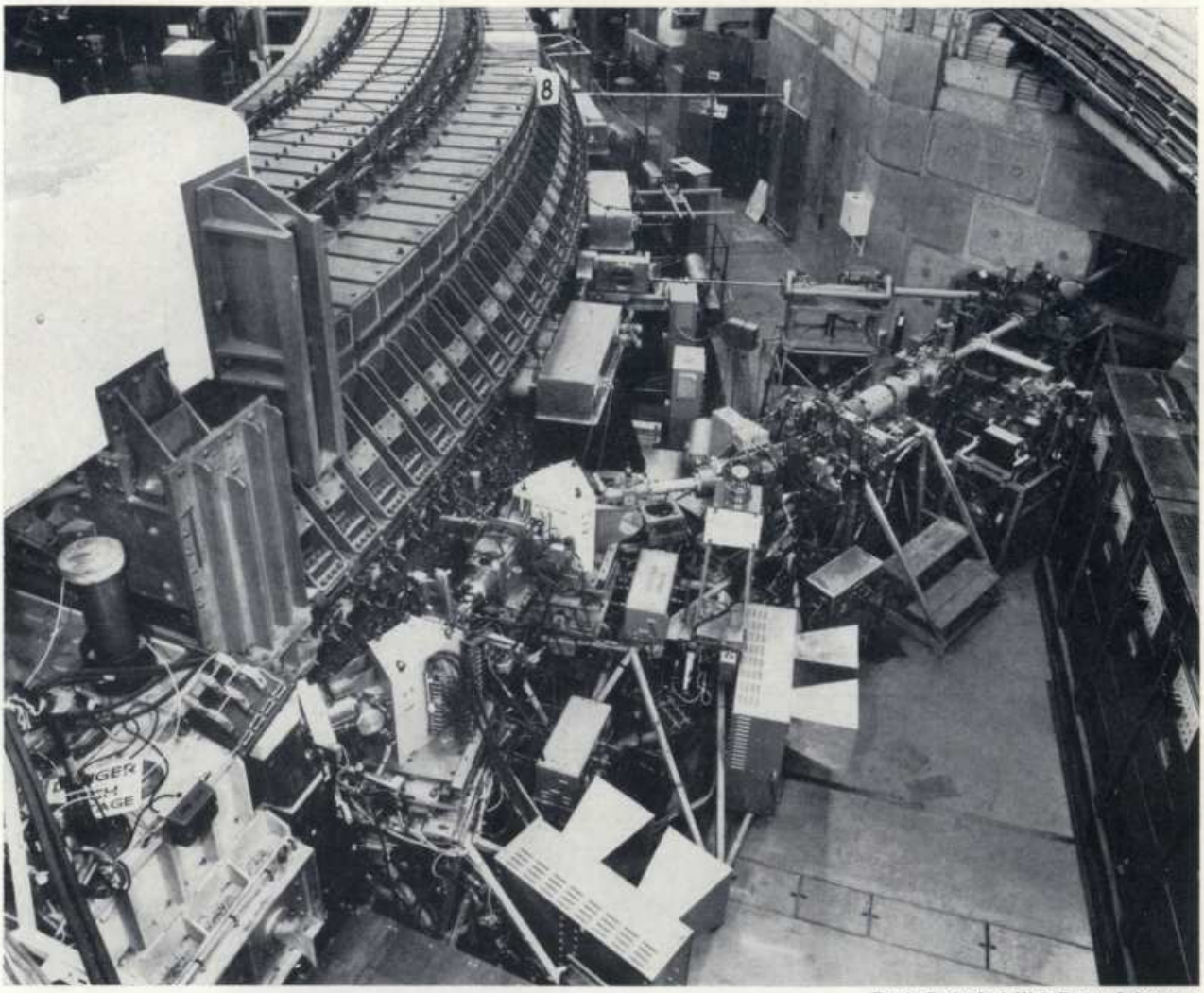
Nemen we als voorbeeld de CPS bij injectie ($\Delta T/T = 10^{-3}$, $\gamma \approx 1$, $R = 100$ m), dan vinden we met $\nu = 6{,}25$ voor de spreiding in evenwichtsbanen: $\Delta R = 1$ mm. Met $\nu = 0{,}7$ zou deze spreiding $\Delta R = 10$ cm geweest zijn! Voor AGS-versnellers is de compactie speciaal van belang als tegenwicht tegen het uitdijen van de bundel bij het passeren van de overgangsenergie (zie fig. 18).

De AG-methode is echter aan één belangrijke beperking onderhevig, althans voor zover de sterk focusserende werking verkregen wordt door middel van een grote (wisselende) veldgradiënt van de individuele afbuigmagneten (zoals bij de AGS en de CPS): er wordt een vrij lage grens q_{max} gesteld aan de „bruikbare halve doorsnede" van de vacuümkamer. Alvorens hier kort op in te gaan, willen we er nog even de nadruk op leggen dat deze beperking alleen geldt voor machines met gecombineerde functies, d.w.z. waarin focussering en afbuiging door dezelfde magneetvelden tot stand worden gebracht en waarin ν en n direct met elkaar samenhangen.

Is B_f het eindveld op de nominale baan, dan moet $B_f + |q(\partial B/\partial r)_f|$ beneden de waarde B_{max} blijven die nog toelaatbaar is in verband met de verzadiging (omstreeks 2,0 tesla). Met behulp van verg. (9) vindt men:

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



Foto's Rutherford High Energy Laboratory

Fig. 33*b*. Het gedeelte van de ring van Nimrod waar de injectie plaatsvindt.

$$q < q_{max} = (B_{max}/B_f - 1)\varrho/n. \quad . \quad . \quad (32)$$

De grootheid n/ϱ noemt men de „profielparameter". *Tabel VI* geeft de waarden van n/ϱ (zoals deze volgen uit de tabellen V en III), van q_{max} (met $B_{max} = 2{,}0$ tesla, $B_f = 1{,}4$ tesla, $B_{max}/B_f - 1 = 0{,}43$), en van de horizontale halve doorsnede q_H die de vacuümkamers in feite hebben. Men ziet dat, op een factor kleiner dan 2 na, de AGS en de CPS van hun maximale bruikbare doorsnede ten volle gebruik hebben gemaakt, terwijl bij de CG-versnellers q_{max} duidelijk *niet* een bepalende factor is geweest bij de keuze van de afmetingen van de dwarsdoorsnede. Beschouwt men dus alleen machines met gecombineerde functies, dan kan bij CG-machines de doorsnede van de vacuümkamer gemakkelijker worden vergroot dan bij AG-machines. De prijs die men voor een dergelijke vergroting van de doorsnede moet betalen is natuurlijk een toeneming van de vereiste hoeveelheid magneetstaal.

De uitzonderingspositie van de ZGS komt in tabel VI duidelijk naar voren: $n = 0$, $q_{max} = \infty$, zodat er in het geheel geen grens wordt gesteld aan de doorsnede op grond van overwegingen betreffende de veldgradiënt. Dit is een gevolg van het feit dat de ZGS, althans in één opzicht, een CG-machine met gescheiden functies is: het afbuigen en het focusseren worden in verschillende gedeelten van het veld bewerkstelligd, en n en ν worden ontkoppeld. Dientengevolge kan men B_f

Tabel VI. De maximale bruikbare en de werkelijke halve vacuümkamerdoorsnede (horizontaal), q_{max} en q_H. q_{max} is berekend voor $B_{max} = 2{,}0$ tesla, $B_f = 1{,}4$ tesla.

		AGS	CPS	ZGS	Nimrod	PPA
n/ϱ	in m^{-1}	4,2	4,1	0	$0{,}03_2$	$0{,}06_6$
q_{max}	in cm	10	10	∞	1300	650
q_H	in cm	6,7	7,3	41	50	9

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

willekeurig dicht bij B_{max} kiezen (zie verg. 32). In de ZGS is dit uitgebuit door, met speciale voorzorgen, B_{max} zo groot mogelijk te maken. *Fig. 34* is een dwarsdoorsnede van de magneet. Men vond dat in het algemeen het veld inhomogeen werd boven 1,8 tesla, ten gevolge van verzadiging van het staal in de omgeving van de spoelen. Door hier echter gaten in het staal te boren, werd de veldverdeling gunstig beïnvloed, waardoor men een maximaal toelaatbaar veld verkreeg van 2,15 tesla. Het resultaat is, zoals reeds eerder gezegd, een relatief compacte machine.

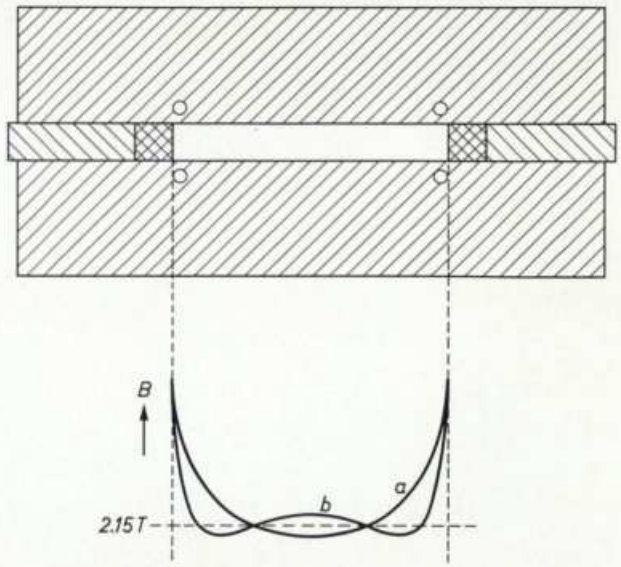


Fig. 34. Dwarsdoorsnede van de ZGS-magneet, schematisch. Door bij de spoelen gaten in het magneetstaal te boren, verkreeg men een grotere homogeniteit van het veld bij grote waarden van de inductie, waarbij verzadiging optreedt. De onderste grafiek geeft de veldverdeling voor een centraal veld van 2,15 tesla, *a* zonder gaten, *b* met gaten.

De potentiële bundelintensiteit

Ten einde de machines nader te kenschetsen wat betreft het aantal deeltjes dat kan worden versneld, beschouwen wij een bundel afkomstig van een zelfde (hypothetische) voorversneller, die „afgetapt" wordt bij de vereiste injectie-energie en die (in één of in meer omlopen) de machine-acceptantie volledig vult, zowel in het horizontale als in het verticale vlak. Het aantal versnelde deeltjes is dan evenredig zowel met de horizontale als met de verticale *acceptantie* van de machine.

Tabel VII. Acceptanties (in mm × mrad).

	AGS	CPS	ZGS	Nimrod	PPA
theoretische horizontale acceptantie ($A_H = \pi q_H^2 \nu_H / FR_0$)	230 π	250 π	5100 π	7500 π	450 π
theoretische gereduceerde horizontale acceptantie ($\beta_i\gamma_i A_H$)	76 π	82 π	1700 π	1300 π	40 π

In de voorversneller krimpt de bundel gedurende de versnelling, en de deeltjesdichtheid in de transversale fazeruimte is des te groter naarmate de energie groter is (deze dichtheid is immers evenredig met $\beta\gamma$, zie blz. 354). Bij een gegeven acceptantie worden er van onze hypothetische voorversneller dus *meer* deeltjes geaccepteerd indien zij bij een hogere energie afgetapt worden. Daarom is de *gereduceerde acceptantie*, d.i. de acceptantie omgerekend van de individuele injectie-energie op een zelfde energie voor alle gevallen, een betere grootheid dan de acceptantie zonder meer om versnellers met elkaar te vergelijken. Men reduceert de acceptantie altijd op de energie waarvoor $\beta\gamma = 1$ is (d.w.z. $\gamma = \sqrt{2}$, $\beta = 1/\sqrt{2}$); de gereduceerde acceptantie is dan $\beta_i\gamma_i A$.

De waarden van de theoretische horizontale acceptantie volgens verg. (21), $A_H = \pi q_H^2 \nu_H / FR$, en de gereduceerde waarden ervan zijn aangegeven in *tabel VII*. (Tussen de theoretische *verticale* acceptanties van de verschillende machines zullen minder grote verschillen bestaan, daar de verschillen in de verticale afmetingen kleiner zijn dan in de horizontale.) Zoals vroeger reeds werd opgemerkt, zijn de praktische acceptanties aanzienlijk kleiner dan de theoretische, omdat er ruimte nodig is voor de energiespreiding in de geïnjecteerde bundel, voor de synchrotron-oscillaties, en voor de zijwaartse verplaatsingen van de centrale baan die er altijd zijn ten gevolge van mechanische of magnetische defecten. Deze extra-ruimte is in CG-machines relatief groot, omdat de impulscompactie zwak is.

Verreweg de grootste theoretische acceptantie hebben Nimrod en de ZGS — twee machines die speciaal met het oog op een grote intensiteit werden ontworpen. De belangrijkste factor bij het verkrijgen van deze grote acceptanties is de *grote dwarsdoorsnede van de vacuümkamer*, waar de acceptantie kwadratisch van afhangt (verg. 21).

In de AGS en in de CPS zijn de q's veel kleiner, hetgeen met de grotere R (en de grotere F) tot zeer veel kleinere acceptanties zou leiden; dit wordt echter gedeeltelijk gecompenseerd door de grotere waarden van ν.

De gunstige invloed van een grote injectie-energie op de „potentiële bundelintensiteit" (zoals deze tot uitdrukking komt in het reduceren van de acceptantie)

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Tabel VIII. Vacuümkamer.

	AGS	CPS	ZGS	Nimrod	PPA
uitvoering kamer	enkelvoudig	enkelvoudig	dubbelwandig	dubbelwandig	enkelvoudig
materiaal van de wand	Inconel	roestvrij staal	roestvrij staal	kunsthars met glaslaag	koper-nikkelen gelamelleerde ribben met lagen van kunsthars en glasvezel
doorsnede $\begin{cases} 2q_H \times 2q_V \text{ (in cm} \times \text{cm)} \\ \text{vorm} \end{cases}$	13,3 × 6,35 elliptisch	14,6 × 7,0 elliptisch	81,3 × 13,3 rechthoekig	100 × 20 rechthoekig	18 × 6 rechthoekig
vacuümpompen ($\approx 10^{-6}$ torr) [*]	72 Evaporion pompen	53 oliediffusie-pompen, 21 getter-ionenpompen	16 oliediffusie-pompen	40 oliediffusie-pompen	24 oliediffusie-pompen
vacuümpompen voor buitenkamer ($1\text{-}10^{-2}$ torr)			16 rotatie-pompen	16 rotatie-pompen	

[*] voorvacuümpompen niet meegerekend

wordt goed geïllustreerd door een vergelijking van de AGS met de PPA in tabel VII: bij de PPA wordt de acceptantie door de reductie met meer dan een factor 10 verlaagd, maar bij de AGS slechts met een factor 3. Een verhoging van de injectie-energie verruimt bovendien de beperking die door ruimteladingseffecten aan de deeltjesdichtheid wordt gesteld. Men dient natuurlijk wel te bedenken dat voor een grotere injectie-energie een grotere en duurdere voorversneller nodig is [9].

Ook als men de horizontale en de verticale acceptantie heeft gereduceerd, is het produkt ervan nog steeds geen geheel juiste maat voor de „potentiële bundelintensiteit". Het aantal versnelde protonen per impuls is (afgezien van verliezen bij het vangen door het h.f. veld) gelijk aan het aantal protonen in de ring na injectie. Derhalve zal de omtrek van de ring ook een rol spelen, evenals de longitudinale dichtheid van de deeltjes in de bundel, die des te kleiner is naarmate de injectiesnelheid (dus de injectie-energie) groter is. Veel belangrijker is echter, dat het in feite aankomt op het aantal deeltjes dat *per seconde* versneld wordt. Daarom kan de PPA, ondanks zijn relatief kleine doorsnede van de vacuümkamer en kleine injectie-energie, met de andere machines concurreren. Immers, het aantal per seconde versnelde protonen is in ieder geval evenredig met de herhalingsfrequentie, en de PPA heeft een herhalingsfrequentie die ten minste 40× zo groot is als die van de andere machines (zie tabel II).

Ook als men dit alles in rekening brengt, is er nog geen overeenstemming tussen de verhouding van de aldus berekende „potentiële bundelintensiteiten" en die van de verkregen intensiteiten, doordat er aanzienlijke verschillen bestaan tussen de geïnjecteerde bundels (kwaliteit van de bron en van de voorversneller, rendement van de injectieprocedure). Bovendien ondervindt men in verschillende mate alsnog de invloed van ruimteladingseffecten, bundelinstabiliteiten, niet-lineariteiten, enz.

De vacuümkamer

De problemen bij het ontwerpen van de vacuümkamer waren geheel verschillend voor de verschillende machines. In fig. 6 hebben we reeds gezien hoe ver de afmetingen van de dwarsdoorsneden uiteenlopen. *Tabel VIII* verschaft enkele gegevens betreffende de afmetingen, de vorm, het materiaal van de wand, en de vacuümpompen.

Behalve vacuümdicht moet de vacuümkamerwand niet-magnetisch zijn, om geen ongewenste invloed op het magneetveld uit te oefenen: vanwege de snelle variaties in het magneetveld moet hij bij voorkeur van niet-geleidend materiaal zijn, om magnetische effecten via wervelstromen te voorkomen; hij moet sterk genoeg zijn om de atmosferische druk te weerstaan, en toch zo dun mogelijk ten einde geen kostbaar volume in het magneetveld in beslag te nemen; er mag zich geen lading op het oppervlak verzamelen; het materiaal moet bestand zijn tegen straling, en het mag geen gassen afgeven die het vacuüm bederven.

De sterkte van de wand is speciaal voor grote vacuümkamers een probleem. Sterkte zonder veel volume in beslag te nemen werd bij Nimrod en de ZGS verkregen door de kamer dubbelwandig te maken. De binnenste kamer (ongeveer 10^{-6} torr) heeft een dunne wand binnen de magneetruimte. Deze behoeft geen grote krachten te weerstaan, daar in de buitenkamer de druk slechts 10^{-2} à 1 torr is. De buitenste wand is gedeeltelijk om de magneet gebouwd, hij bevat de magneetpoolschoenen en (een gedeelte van) de spoelen, en hij ontleent zijn sterkte gedeeltelijk aan de magneet. De binnenwand is bij Nimrod gemaakt van isolerend materiaal, bij de ZGS van panelen van roest-

[9] Bij de AGS en de CPS bestaan plannen voor nieuwe injectoren in plaats van de huidige 50-MeV-injectoren (tabel XI), te weten een „aanjaagsynchrotron" van 800 MeV voor de CPS en een lineaire versneller van 200 MeV voor de AGS. Daarmee hoopt men intensiteiten van 10^{13} protonen per impuls te bereiken (vergelijk tabel II).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

vrij staal die door vrijwel isolerend materiaal met elkaar zijn verbonden.

Het wervelstroomprobleem is speciaal bij de PPA van belang wegens de snelle veldvariaties. De vacuümkamerwand is gemaakt van gelamelleerde U-vormige ribben van een koper-nikkel-legering, die op een roestvrij stalen plaat buiten de magneetspleet geklemd zijn (*fig. 35*); zij zijn bedekt met een huid van kunsthars en glasvezel.

In de AGS en de CPS is de dwarsdoorsnede van de vacuümkamer elliptisch; in de AGS is de wand van Iconel, in de CPS van roestvrij staal. In de AGS is de weerstand van de wand juist groot genoeg, alleen bij de zwakste velden zouden de wervelstroomeffecten relatief zo groot kunnen zijn dat zij ontoelaatbare storingen zouden veroorzaken. Om dit te voorkomen, heeft men een smoorspoel in de magneetstroomschakeling opgenomen die de verandering van B in de beginperiode vertraagt, maar die verzadigd wordt, en dus onwerkzaam, bij sterkere velden. Deze smoorspoel is een indrukwekkende installatie van 200 ton!

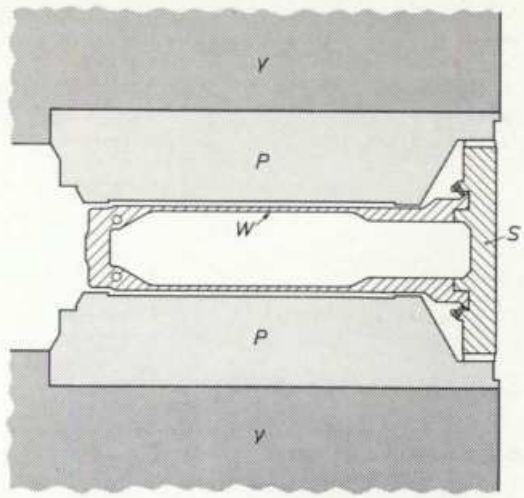


Fig. 35. Dwarsdoorsnede van de vacuümkamer van de PPA. De wand bestaat uit ribben W van een koper-nikkel-legering, die aan een roestvrij stalen plaat S buiten de eigenlijke magneetruimte bevestigd zijn. De ribben zijn bedekt met lagen van kunsthars en glasvezel. Zij zijn gelamelleerd om wervelstromen in de wand te voorkomen. P poolschoenen, Y magneetjuk.

De magnetische cyclus en de magneetvoeding

In alle machines, behalve de PPA, wordt het magneetveld gevarieerd volgens een programma van het type van fig. 9. Bij een dergelijk programma moet men in de stijgtijd een grote spanning op de magneetspoelen zetten ten einde de verlangde $\dot{B}$ te produceren. Slechts een klein gedeelte van deze spanning is nodig om de piekstroom in de vlakke top te handhaven. In de piek bevat het magneetveld een grote hoeveelheid magnetische energie; gedurende de veldloze periode wordt deze energie als mechanische energie in vliegwielen opgeslagen (bij de CPS doet de rotor van de motor-generator, die hieronder ter sprake komt, als zodanig dienst).

De wijze waarop de magnetische veldvariatie wordt bewerkstelligd is schematisch aangegeven in *fig. 36*. Bij toenemend veld drijft het vliegwiel een generator A aan, waarvan de uitgang via een gestuurde gelijkrichter R op de magneet wordt aangesloten. Bij afnemend veld wordt R omgekeerd, en de generator A, die nu werkt als een op de magnetische energie lopende

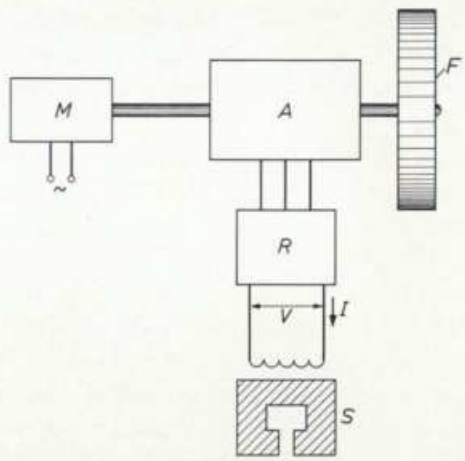


Fig. 36. De magneetvoeding, schematisch (AGS, CPS, ZGS, Nimrod). Gedurende de stijgtijd drijft het vliegwiel F de generator A aan. De uitgang van A is op de gestuurde gelijkrichter R aangesloten, zodat er in de spoelen van de synchrotronmagneten S een gelijkstroom ontstaat. Bij afnemend veld wordt de gelijkrichter geïnverteerd, en A werkt nu als een op de magnetische energie lopende motor, die het vliegwiel versnelt. De energieverliezen worden gecompenseerd door de motor M.

Tabel IX. Magneetcyclus. De opgegeven tijden zijn slechts representatieve waarden voor versnelling tot de vermelde eindenergie.

		AGS	CPS	ZGS	Nimrod	PPA
eindenergie	in GeV	30	25	12,5	7	3
periode van de cyclus	in s	2,4	2,5	2,3	2,7	0,054
stijgtijd	in s	0,8	0,75	1	0,7	} sinusvormige variatie met voorveld
vlakke top	in s	0,5	0,5	0,3	0,55	

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

motor, transporteert de energie weer naar het vliegwiel. Het energieverlies per cyclus, dat altijd nog een belangrijk deel uitmaakt van de maximale magnetische energie, wordt gecompenseerd door een op het net aangesloten motor. Het energieverlies is voornamelijk Joulewarmte die in de spoelen wordt ontwikkeld; deze wordt door koelwater afgevoerd. Het verloop van de spanning over de spoelen, de stroom in de spoelen en de rotatiesnelheid van de vliegwielen zijn zeer schematisch weergegeven in *fig. 37*. De variatie in de snelheid van het vliegwiel bedraagt gewoonlijk slechts 10% of minder. Karakteristieke gegevens betreffende de magneetcyclus en de magneetvoeding vindt men in de *tabellen IX* en *X*.

Wat de variatie van het magneetveld betreft, en de wijze waarop deze wordt verkregen, verschilt de PPA geheel van de andere machines. De bovenbeschreven methode zou bij 20 cycli per seconde onpraktisch zijn. In plaats daarvan zijn de magneetspoelen met condensatoren samengebouwd tot een resonant systeem dat resoneert bij 19,5 Hz; hierin wordt een sinusvormig variërende magneetstroom geproduceerd. Door daarop een gelijkstroom te superponeren die ongeveer gelijk is aan de amplitude van de wisselstroom, verkrijgt men een totale stroom die varieert tussen tennaastebij nul en een maximumwaarde. De resulterende veldvariatie ziet men in *fig. 38*.

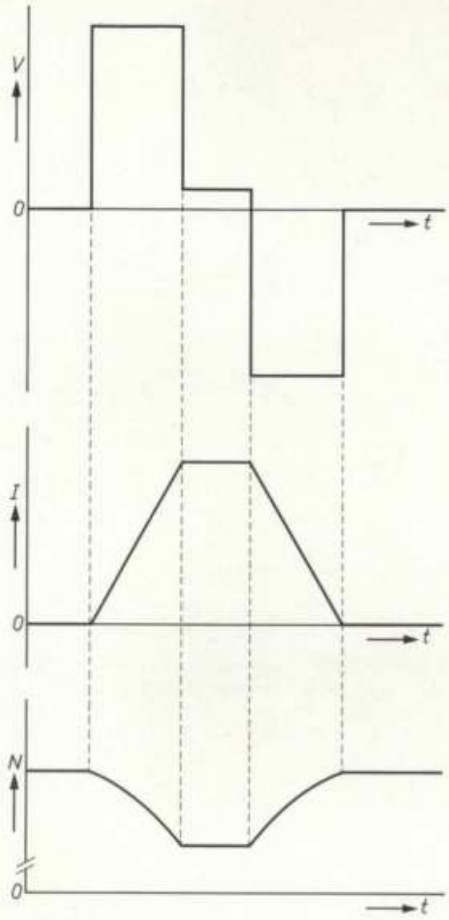


Fig. 37. De spanning V over de spoelen, de stroom I door de spoelen en het toerental N van het vliegwiel, als functie van de tijd (AGS, CPS, ZGS, Nimrod).

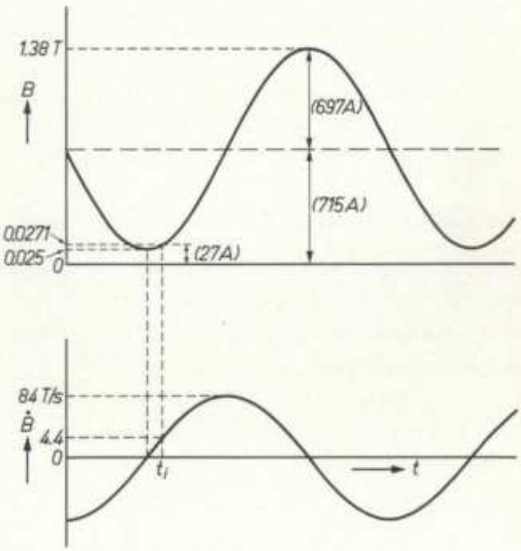


Fig. 38. Variatie van B en $\dot{B}$ bij de PPA, schematisch. t_i tijdstip van injectie.

Tabel X. Magneetvoeding, voor de vermelde eindwaarden van het magneetveld (eind 1969).

		AGS	CPS	ZGS	Nimrod	PPA
eindveldinductie	in tesla	1,3	1,4	2,14	1,4	1,38
topwaarde van de magnetische energie	in MJ	14	15	47,7	40	1,5
ingangsvermogen topwaarde	in MW	30	32	110	160	
ingangsvermogen gemiddeld	in MW	2,4	1,6	10	2,5	2,5
energie wordt bij zwak veld opgeslagen in		vliegwiel 47 ton 850 omw/min	vliegwiel [*] 1000 omw/min	vliegwiel 90 ton	twee vliegwielen 40 ton elk 930 omw/min	condensator + luchtspoel (87000 kvar bij 19 Hz)
topstroom	in A	7000	6400	11000	8600	697 wisselstroom + 715 gelijkstroom
topspanning	in kV	6	7,6	9,5	15,5	7,5

[*] De rotor van de generator fungeert als vliegwiel.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

De resonante magneetvoeding van de PPA is, voor het geval van vier magneetsecties, schematisch afgebeeld in *fig. 39*; in werkelijkheid zijn er 16 magneetsecties. Het systeem moet een smoorspoel bevatten, die de condensatoren kortsluit voor de gelijkstroom maar een grote impedantie heeft voor de wisselstroom (L_2 in fig. 39). Als zodanig doet een, in 16 secties verdeelde, grote spoel (zonder ijzerkern) van 130 ton dienst, die tevens, te zamen met een aantal primaire windingen, de transformator vormt die bij het genereren van de wisselstroom gebruikt wordt. Bij zwak veld is de energie gedeeltelijk opgeslagen in de condensatoren en gedeeltelijk in de spoel. De condensatoren en de smoorspoel zijn op het dak van het gebouw ondergebracht (*fig. 40*; zie ook fig. 2). De kwaliteitsfactor Q van het resonante systeem is 70. Hoewel de PPA betrekkelijk bescheiden van afmetingen is en zijn magnetische topenergie relatief klein, zijn niettemin de topwaarde van het vermogen dat de magneet ingaat en het gemiddelde gedissipeerde vermogen vergelijkbaar met die in de grotere machines. Ook dit staat in direct verband met de hoge herhalingsfrequentie. Een belangrijk gedeelte van de gedissipeerde energie zijn hysteresisverliezen in het magneetstaal; de hierdoor ontwikkelde warmte wordt afgevoerd door lucht die door spleten in het staal stroomt.

Injectie van de bundel en het vangen door het h.f. veld

Enkele gegevens betreffende de injectie zijn samengevat in *tabel XI*. Het injectiesysteem van Nimrod werd reeds afgebeeld in fig. 33*b*; dat van de AGS ziet men in fig. 2 van het voorgaande artikel [1].

Het aantal per seconde versnelde protonen wordt in principe gegeven door: de opbrengst van de bron plus voorversneller; de „potentiële bundelintensiteit" van het synchrotron zoals hierboven werd besproken (blz. 370); het injectierendement, d.i. het rendement van de injectieprocedure waarmee de acceptantie gevuld wordt; en het vangrendement, d.i. het rendement waarmee de protonen door de h.f.-lussen worden gevangen.

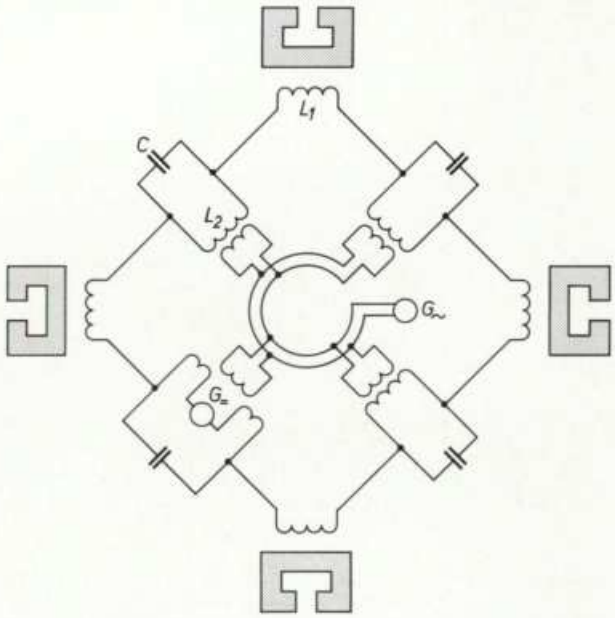


Fig. 39. De resonerende magneetvoeding van de PPA, getekend voor een magneet van vier secties. In werkelijkheid zijn er 16 secties. L_1 magneetspoel. L_2 sectie van smoorspoel (zonder ijzerkern). C condensatoren. $G_=$ gelijkstroomgenerator. $G_\sim$ wisselstroomgenerator.

Tabel XI. Injectie.

		AGS	CPS	ZGS	Nimrod	PPA
kinetische energie bij injectie (T_i)	in MeV	50	50	50	15	3
veld bij injectie (B_i)	in millitesla	12,1	14,7	48,2	29,9	27,0
$\beta_i = v_i/c$		0,31	0,31	0,31	0,175	0,081
$f_i = \beta_i f_c$	in MHz	0,125	0,145	0,55	0,354	0,31
duur van injectie (aantal omlopen)		10	1 tot 3 [*]	60	120	9
$\dot{B}$ bij injectie ($\dot{B}_i$)	in tesla per s	0,3	1,4 [*]	2,2	0,8	4,4
normale $\dot{B}$ gedurende de versnelling	in tesla per s	1,5	1,7	2,2	2,0	84 (max.)
krimp van de straal per omloop (ΔR)	in mm			3,2	3,6	10
protonenbron [**]		D	D	D	RF	PIG
spanning van de hoogspanningsgenerator	in kV	750	500	750	600	—
voorversneller: soort [***]		L	L	L	L	G
voorversneller: frequentie	in MHz	202	202	202	115	
bundelemittantie (horizontaal en verticaal) [****]	in mm × mrad	10 π	30 π	28 π	50 π	2 π

[*] $\dot{B}_i$ kan tot 0,35 tesla per s worden gereduceerd. Het is echter op dit ogenblik moeilijk te zeggen welk injectieschema het meest efficiënt is.
[**] D = Duoplasmatron (Von Ardenne-bron), RF = hoogfrequentbron, PIG = Penning-manometer.
[***] L = lineaire versneller, G = Van de Graaff-versneller.
[****] Als bundelemittantie is hier opgegeven de oppervlakte in de fazeruimte waarin zich 95% van de bundel bevindt.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Het vergroten van de opbrengst van de bron plus voorversneller is een zaak waaraan veel aandacht wordt besteed [8], maar waarop wij hier niet ingaan.

Wat het *injectierendement* betreft, herinneren wij er in de eerste plaats aan dat de injectie-energie groot genoeg moet zijn om de ruimteladingseffecten (blz.358) verwaarloosbaar te maken. We merken op dat injectieveld en -energie bij de ZGS en Nimrod — beide ontoscillaties (zie fig. 24). In de PPA past men multipele injectie *op* de evenwichtsbaan toe, zonder betatronoscillaties. Hiertoe moet de snelheid waarmee de baan krimpt, dus ook $\dot{B}_i$ (zie verg. 30), voldoende groot zijn, terwijl men de energie van de geïnjecteerde protonen gedurende de injectie geleidelijk moet verhogen (in dit geval in totaal met een bedrag van 35 keV).

Oorspronkelijk dacht men dat het niet goed doenlijk

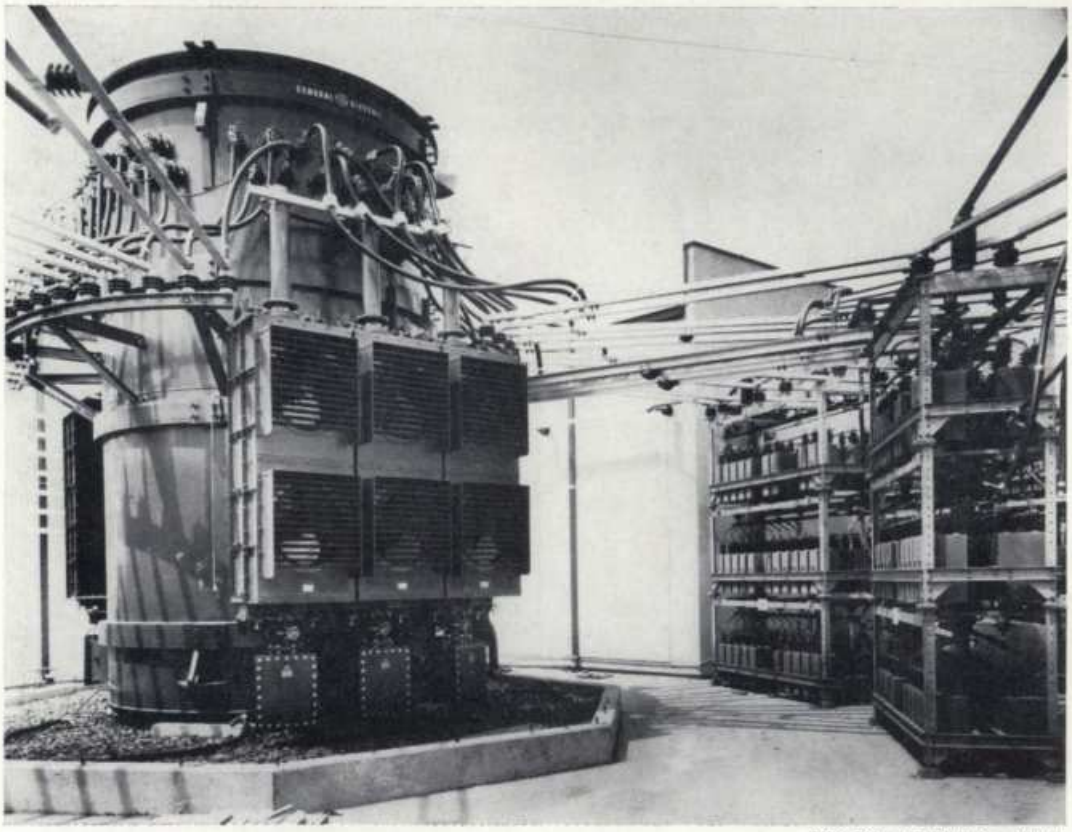


Foto Princeton-Penn Accelerator

Fig. 40. De condensatoren en de smoorspoel (L_2 in fig. 39), op het dak van het PPA-gebouw, die samen met de synchrotronmagneten een resonant systeem vormen.

worpen voor hoge intensiteiten — relatief hoog zijn (zie ook fig. 30); dit is inderdaad voornamelijk in verband met ruimteladingseffecten. In de AGS en de CPS kon men een injectiemagneetveld kiezen dat niet ver boven de door remanentie en de spreidingsvelden gestelde limiet ligt [10]. In de PPA wordt het mede bepaald door de vereiste B (zie hieronder).

Het aantal injectie-omlopen moet ruwweg gelijk worden gekozen aan de verhouding van de acceptantie tot de emittantie van de geïnjecteerde bundel. Aangezien de emittanties bij injectie van dezelfde orde van grootte zijn, wordt het aantal injectie-omlopen dan ruwweg evenredig met de theoretische acceptantie (vergelijk de tabellen XI en VII). In de ZGS en in Nimrod wordt multipele injectie toegepast met behulp van betatron-

was multipele injectie in AG-machines toe te passen, en men hield aan het CG-principe vast als een grote intensiteit één van de voornaamste doelstellingen was. Intussen is het mogelijk gebleken ook in AG-machines multipele injectie toe te passen (blz. 362); dit is van groot belang omdat de emittantie van de geïnjecteerde bundel steeds klein is vergeleken met de acceptantie van de machine. In de AGS past men een injectie van tien omlopen regelmatig toe; samen met een verhoogde opbrengst van bron plus voorversneller geeft dit een winst in intensiteit van omstreeks een factor 5 vergeleken met de oorspronkelijke enkelvoudige injectie. In de CPS heeft men een injectie van drie omlopen beproefd.

[10] Bij gebruik van de in noot [9] genoemde nieuwe injectoren wordt B_i natuurlijk overeenkomstig groter.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Dit blijkt te lukken maar het wordt nog niet regelmatig toegepast; men verwacht er een winst mee te boeken van 1,6 tot 2 vergeleken met de enkelvoudige injectie.

Het *vangrendement* is evenredig met de grootte van de h.f.-lus bij inschakeling van het h.f. veld. Zoals wij vroeger zagen, moet $\dot{B}_i/V_m$ klein zijn om een grote lus te verkrijgen. In tabel XI ziet men dat $\dot{B}_i$ aanzienlijk kleiner is dan de normale $\dot{B}$ bij de AGS, bij Nimrod, bij de PPA en ook bij de multipele injectieproeven bij de CPS; daarmee bereikt men een lusbreedte van omstreeks 2π (in plaats van π bij de normale synchrone fazehoek van 60°). In de PPA is de kleine $\dot{B}_i$ een natuurlijke consequentie van de sinusvormige variatie van het veld (fig. 38). In de AGS wordt de kleine $\dot{B}$ veroorzaakt door de genoemde grote smoorspoel, die oorspronkelijk toegevoegd werd om de wervelstromen in de vacuümkamerwand bij injectie te reduceren (blz. 372); het voordeel bij het vangen van de deeltjes door het h.f. veld werd pas later ontdekt. Bij de CPS en bij Nimrod wordt de reductie van $\dot{B}$ bij injectie verkregen door reduceren van de spanning die op de magneet gezet wordt. Het vangrendement wordt dikwijls nog verder vergroot door de op blz. 363 (fig. 27) besproken kunstgreep toe te passen. De beste oplossing moet echter nog vaak empirisch worden gevonden.

De versnelling en de versnellingsstations

Gegevens betreffende de versnelling en de versnellingsstations zijn in *tabel XII* verzameld. Als eenmaal de magnetische veldcyclus gegeven is, ligt ook $\dot{B}$ op elk tijdstip gedurende de versnelling vast, en daarmede de vereiste energietoeneming per omloop (volgens verg. 22). De keuze van de synchrone fazehoek φ_0 en het aantal spleten per omloop, M, bepaalt dan verder de topspanning V_m per spleet.

Behalve bij de PPA zijn de versnellingstrilholtes alle variaties op het schema van fig. 5 van het voorgaande artikel (blz. 325), en zij werden in fig. 7 van dat zelfde artikel in wat meer detail behandeld. Enkele verdere gegevens vindt men in tabel XII.

In de PPA is het h.f.-systeem aanzienlijk ingewikkelder dan in de andere machines, hetgeen samenhangt met de snelle en sinusvormige variatie van het magneetveld, en met de lage injectie-energie. In de eerste plaats is, als gevolg van het feit dat de maximale $\dot{B}$ veel groter is dan bij de andere machines (zie tabel XII), de vereiste energietoeneming per omloop, ondanks de kleine straal, vergelijkbaar met die bij de andere machines. Om deze reden is een relatief groot aantal van de rechte stukken (vier van de acht) bezet door h.f.-stations. In de tweede plaats is de vereiste frequentiezwaai zeer groot ten gevolge van de lage injectie-energie (zie ook fig. 31), zodat het niet doenlijk is een trilholte op de gebruikelijke wijze af te stemmen. De protonen worden in twee etappes versneld: in het eerste frequentiestuk met behulp van een loopbuis, en in het tweede door een trilholte (zie fig. 7 van het voorgaande artikel). Ten slotte moet, aangezien $\dot{B}$ hier gedurende de ver-

Tabel XII. Versnelling en versnellingsstations (eind 1969).

		AGS	CPS	ZGS	Nimrod	PPA
$\dot{B}$ gedurende de versnelling [*]	in tesla per s	1,5	1,7	2,2	2,0	84 (max.)
energietoeneming per omloop ($MeV_m \cos\varphi_0$) [*]	in keV	100	75	10	5,5	61 (max.)
synchrone fazehoek (φ_0) [*]		± 60°	± 60°	60°	60°	60°
aantal trilholtes		12	14	1	1	4
aantal spleten per trilholte		2	1	3	2	2 [**]
aantal spleten in de ring (M)		24	14	3	2	8 [**]
topspanning per spleet (V_m)	in kV	8	10	8,0	5	5,5 (max.)
totale h.f.-ingangsvermogen — topwaarde	in kW	300	70	60	45	320
totale h.f.-ingangsvermogen — gemiddeld	in kW		60	30	20	80
lengte van de trilholte	in m	3	2,3	2,03	2,1	1,5
lengte van de spleten	in cm	3	3	7,6	7,6	7,5
isolatiemateriaal van de spleten		keramiek	glas	keramiek	polytheen	Al_2O_3
omloopfrequentie bij injectie (f_i)	in MHz	0,117	0,145	0,55	0,354	0,31
omloopfrequentie na versnelling (f_f)	in MHz	0,372	0,478	1,75	1,995	3,75
frequentieverhouding ($h = f_a/f$)		12	20	8	4	8
frequentie van de h.f. spanning bij injectie ($f_{ai} = hf_i$)	in MHz	1,40	2,90	4,4	1,42	2,5
eindfrequentie van de h.f. spanning ($f_{af} = hf_f$)	in MHz	4,46	9,56	14,0	7,98	30
frequentiezwaai (f_{af}/f_{ai})		3,2	3,3	3,2	5,6	12
frequentieregeling van de h.f. spanning		„boot-strapping", fazevergrendeling	fazevergrendeling	fazevergrendeling	fazevergrendeling	fazevergrendeling

[*] $\dot{B}$ is niet geheel constant, waardoor ook de energietoeneming per omloop en de synchrone fazehoek iets variëren.
[**] Bij de PPA zijn er in feite vier spleten per versnellingsstation, maar daarvan zijn er telkens slechts twee actief; zie fig. 7 van [1].

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

snelling aanzienlijk varieert, de amplitude van de spleetspanning eveneens sterk variëren om de synchrone fazehoek de normale waarde van 60° gedurende de versnelling te laten behouden (verg. 22).

De parameter h en het aantal spleten M

De keuze van de frequentieverhouding $h = f_h/f$ en van het aantal trilholtes of spleten M is een delicaat compromis, aangezien er allerlei argumenten zijn, zowel ten gunste van grote als van kleine waarden. M en h hangen ten nauwste samen. Indien de trilholtes onderling in faze worden gehouden [11], moet h gelijk aan M zijn of groter. Is h groter dan M, dan is de beweging van trilholte tot trilholte niet isochroon, hetgeen een bron vormt voor synchrotron-oscillaties. Uit dit oogpunt is $h = M$ de beste keuze. Een kleine M (en dus een kleine h) is gunstig op grond van de overweging dat elk versnellingsstation een kostbare eenheid vormt die veel, eveneens kostbare, ruimte van de rechte stukken in beslag neemt; anderzijds maakt een grote M (dus een grote h) het mogelijk het totale h.f.-vermogen te reduceren (zie blz. 348). Als verdere argumenten ten gunste van een *kleine* waarde van h kan men noemen: a) de h.f.-lus bij injectie wordt groot, waardoor het rendement voor het vangen van deeltjes groot wordt (blz. 358); b) een grote afstand tussen de pakketten vergemakkelijkt de bundelextractie. Een *grote* h is anderzijds nog gunstig om de volgende redenen: a) de frequentie van de synchrotron-oscillaties, en derhalve de „terugdrijvende kracht", is groot (verg. 28), hetgeen kleine synchrotronamplitudes met zich meebrengt; b) de trilholtes kunnen klein zijn, daar de lengte omgekeerd evenredig is met f_h; c) een bundel met een groot aantal pakketten benadert een homogene verdeling van de deeltjes in de ring, hetgeen in sommige gevallen als gunstig beschouwd wordt. In tabel XII ziet men dat de gekozen waarden voor h bij de vijf machines variëren van 4 (bij Nimrod) tot 20 (bij de CPS).

De einddikte van de bundel

Het algemene doel van een versneller is het produceren van een versnelde bundel van grote intensiteit. Daarnaast kan het echter tevens van belang zijn de versnelde deeltjes in een *dunne* bundel geconcentreerd te hebben. Wordt de bundel op een trefplaatje in de vacuümkamer opgevangen, dan is het experimentele rendement niet sterk afhankelijk van de bundeldikte; immers, dan wordt de protonenbundel door het plaatje in een groot aantal omlopen geheel afgeschild. Wordt de bundel echter geëxtraheerd, dan treft deze slechts eenmaal een uitwendig object over de volle breedte, en in dat geval is het wenselijk een groot aantal deeltjes per cm², dus een dunne bundel, te hebben. (Om deze reden is het beter het aantal versnelde deeltjes te vergroten door vergroting van de intensiteit van de geïnjecteerde bundel dan door vergroting van de acceptantie van de machine.)

Verwaarlozen we een aantal storende effecten (het uitdijen bij passeren van de overgangsenergie, instabiliteiten, veldvervorming, niet-constantheid van n, enz.), dan zou de eindafmeting van de bundel bepaald moeten worden door de doorsnede van de vacuümkamer en de krimp gedurende de versnelling (verg. 31). De krimpfactor in de breedte is $\sqrt{B_i/B_f}$. De inductie van het eindveld B_f heeft een, door verzadiging bepaalde, tamelijk vaststaande waarde van 1,4 à 2,0 tesla, maar de inducties bij injectie B_i, die door allerlei overwegingen worden bepaald, lopen sterker uiteen. $\sqrt{B_i/B_f}$ is ruwweg 1/10 voor de AGS en de CPS, en 1/7 voor de ZGS, Nimrod en de PPA. In feite zijn de bundeldiktes aan het einde van de versnelling niet goed beknd.

Slotopmerkingen

In dit artikel hebben we vijf synchrotrons besproken die protonen versnellen tot in het energiegebied van 3 tot 30 GeV. De grootste twee daarvan, het CERN-protonensynchrotron te Genève en het Alternating Gradient Synchrotron te Brookhaven, hebben lange tijd aan de spits gestaan bij het produceren van energierijke deeltjes. Sinds 1967 zijn zij voorbijgestreefd door het protonensynchrotron voor 80 GeV te Serpukhov in Rusland.

In de kernfysica is de belangstelling voor nog veel hogere deeltjesenergieën zeer groot. Voor het versnellen van deeltjes tot 300 GeV beschouwt men het AG-protonensynchrotron nog steeds als de beste soort machine. In principe is er niets op tegen, het ontwerp van de bestaande AG-synchrotrons toe te passen voor het bouwen van een ring die 10× zo groot is, ten einde een energiegebied te bereiken dat 10× zo hoog ligt. De kosten zullen dan ruwweg een lineaire functie van de deeltjes-eindenergie zijn. (Bij het klassieke cyclotron zouden de kosten evenredig zijn met globaal de derde macht van de energie!)

In feite is de voorbereiding van de bouw van versnellers in het 300-GeV-gebied reeds ver gevorderd. Onvoorziene omstandigheden voorbehouden, zullen in Amerika de plannen voor een AG-synchrotron voor 200-400 GeV in Battavia bij Chicago tot uitvoering worden gebracht. Dit zal een machine met gescheiden functies worden: de afbuiging zal worden bewerkstelligd door afbuigmagneten met vlakke polen en de focussering door quadrupoollenzen tussen de afbuigmagneten. Daardoor zal een zeer sterke focussering

[11] In de AGS zijn zes trilholtes onderling in faze, de overige zes in antifaze met de eerste. Bij de CPS kan de faze van de helft van de trilholtes gevarieerd worden ten opzichte van die van de rest.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

kunnen worden verkregen met behulp van sterke gradiënten zonder de bruikbare vacuümkamerdoorsnede te beperken (vgl. blz. 368). In Europa is er een gezamenlijk project voor een 300-GeV-protonensynchrotron met een diameter van 2,4 km. Het ontwerp voor deze machine is al in detail uitgewerkt bij CERN in Genève, en verschillende plaatsen in Europa waar de machine zou kunnen worden gebouwd zijn zorgvuldig bestudeerd (o.a. betreffende de bodemvastheid en -stabiliteit), maar tot een besluit betreffende de uitvoering is het nog niet gekomen (december 1969).

Een andere lijn van ontwikkeling, waarbij effectief nog veel hogere botsingsenergieën ter beschikking komen, is die van de „opslagringen" (storage rings); daar kunnen wij hier echter niet op ingaan [12].

De vijf besproken machines zijn representatief voor het energiegebied dat tot nog toe door protonensynchrotrons wordt bestreken, en voor de daarin toegepaste technieken. De directe aanleiding om juist deze machines voor een bespreking uit te kiezen was het feit dat in alle vijf een Philips-ferriet wordt gebruikt om de versnellingsstations voldoende klein te houden en om ze af te stemmen op de veranderende omloopfrequentie van de versnelde deeltjes, zoals in het voorgaande artikel werd uiteengezet. In de volgende generatie van machines, voor energieën van meer dan 100 GeV, zal in de versnellingsstations geen ferriet meer voor afstemming nodig zijn: de deeltjes zullen geïnjecteerd worden met een snelheid die vrijwel gelijk is aan die van het licht, de omloopfrequentie zal dus nauwelijks veranderen en afstemming van de versnellende spanning zal derhalve — evenals bij het klassieke cyclotron maar om een geheel andere reden — overbodig zijn. Deze toekomstige machines zullen echter als injector waarschijnlijk een „aanjaagsynchrotron" krijgen, voor energieën in het tussengebied, dat wèl weer een frequentiezwaai zal vereisen, waarvoor wellicht toch weer de μ-variatie van ferrietmaterialen te pas zal worden gebracht.

[12] Zie b.v. G. K. O'Neill, Storage rings, Science **141**, 679-686, 1963.

Literatuur

Voor protonensynchrotrons in het algemeen verwijzen wij verder naar de volgende boeken en artikelen.
E. D. Courant en H. S. Snyder, Theory of the alternating-gradient synchrotron, Ann. Physics **3**, 1-48, 1958.
H. Bruck, Les accélérateurs circulaires de particules, Presses Universitaires de France, 1966.
K. G. Steffen, High energy beam optics, Interscience Publ., New York 1965.
M. S. Livingston en J. P. Blewett, Particle accelerators, McGraw-Hill, New York 1962.
R. Gouiran, Particles and accelerators, McGraw-Hill, New York 1967.
G. K. Green en E. D. Courant, The proton synchrotron, Handbuch der Physik, deel 44, 218-340, Springer, Berlijn 1959.
J. P. Blewett, The proton synchrotron, Rep. Progr. Phys. **19**, 37-79. 1956.
Proceedings of the 1965 en 1967 Particle Accelerator Conferences in Washington D.C., IEEE Trans. **NS-12**, no. 3, 1965 en **NS-14**, no. 3, 1967.
Meer gespecialiseerde informatie over een van de synchrotrons is veelal, op aanvrage bij het desbetreffende laboratorium, te verkrijgen in de vorm van interne rapporten. Artikelen over de AGS zijn nog gepubliceerd in Science **128**, 1393-1401, 1958 en in IRE Int. Conv. Rec. **8**, deel 9, 3-27, 1960.

Samenvatting. Voor vijf synchrotrons, die protonen versnellen tot energieën in het gebied van 3 tot 30 GeV, heeft Philips de vereiste grote hoeveelheden ferroxcube geleverd. Dit was een gerede aanleiding om deze vijf machines, die weliswaar alle protonensynchrotrons zijn maar overigens grote verschillen vertonen in uiterlijk en detail, gezamenlijk te bespreken. Zo heeft men gelegenheid vergelijkingen te treffen en daardoor de speciale kenmerken van elke machine duidelijk te doen uitkomen. Als inleiding wordt in het eerste gedeelte het protonensynchrotron in het algemeen behandeld. Na het verband tussen eindveld van de afbuigmagneten, eindenergie van de protonen en straal van de ring, en de synchronisatie van de versnellende spanning met de rondlopende protonenpakketten, komen in het bijzonder de stabiliteit van de protonenbanen en daarmee de focusserende eigenschappen van de versneller ter sprake. De transversale focussering, waarmee (transversale) betatron-oscillaties van de protonen om een evenwichtsbaan gepaard gaan, ontstaat hetzij door een dwarsgradiënt in het afbuigveld (in „machines met gecombineerde functies"), hetzij door andere velden („gescheiden functies"). Tijdens de versnelling krimpt de bundel in doorsnede (de betatronamplitudes nemen af). Met de longitudinale of faze-focussering gaan synchrotron-oscillaties gepaard (oscillaties in baan, faze en energie om het zg. synchrone deeltje). Van de zwak focusserende of CG-versnellers (met een kleine constante dwarsgradiënt) onderscheiden de sterk focusserende of AG-versnellers (grote alternerende gradiënt) zich door *snelle* betatron-oscillaties van *kleine* amplitude, een *kleine* spreiding in evenwichtsbanen bij gegeven impulsspreiding (sterke „impulscompactie"), en door het bestaan van een overgangsenergie, waarbij de h.f. spanning een fazesprong moet maken om fazestabiliteit te handhaven. In de, zwak focusserende, „zero-gradient" (ZG-) versnellers, met dwarsgradiënt nul, ontstaat de focussering door een scheve stand van de magneeteindvlakken (gescheiden functies). Bij het injecteren van de protonen in de ring maakt men gebruik van het krimpen van de evenwichtsbaan in het toenemende magneetveld bij constante energie, en ook van de betatron-oscillaties daaromheen. Speciale maatregelen worden getroffen om bij het inschakelen van de h.f. spanning zoveel mogelijk fazestabiele deeltjes te krijgen.

In het tweede gedeelte worden de speciale kenmerken van de vijf synchrotrons aan de hand van numerieke gegevens besproken. 1) Het Alternating Gradient Synchrotron (33 GeV) te Brookhaven (U.S.A.) en 2) het CERN Proton Synchrotron (28 GeV) te Genève onderscheiden zich door toepassing van het AG-principe, het passeren van de overgangsenergie en het bereiken van het 30 GeV-gebied. 3) Het Zero Gradient Synchrotron (12,7 GeV) te Argonne (U.S.A.), met gradiënt nul, heeft een sterk eindveld (2,1 tesla in plaats van 1,4 tesla elders) en is daardoor relatief compact. 4) Nimrod, het 7-GeV-synchrotron te Chilton (Engeland), heeft een zeer grote vacuümkamer en daardoor potentieel een grote bundelintensiteit. 5) De Princeton-Pennsylvania Accelerator (3 GeV) te Princeton (U.S.A.) kan, ondanks bescheiden afmetingen, een groot aantal protonen per seconde versnellen, door een hoge herhalingsfrequentie. De energie in het topmagneetveld wordt bij zwak veld meestal in vliegwielen opgeslagen, alleen bij de PPA in condensatoren.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Recente wetenschappelijke publikaties

Deze publikaties zijn afkomstig van medewerkers van laboratoria en fabrieken, behorende tot of samenwerkende met ondernemingen van het Philipsconcern, in het bijzonder van medewerkers van de navolgende research-laboratoria:

Philips' Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven *E*
Mullard Research Laboratories, Redhill (Surrey), Engeland *M*
Laboratoires d'Electronique et de Physique Appliquée, Limeil-Brévannes (Val-de-Marne), Frankrijk *L*
Philips Zentrallaboratorium GmbH, Laboratorium Aken, Weisshausstrasse, 51 Aachen, Duitsland *A*
Philips Zentrallaboratorium GmbH, Laboratorium Hamburg, Vogt-Kölln-Strasse 30, 2 Hamburg-Stellingen, Duitsland *H*
MBLE Laboratoire de Recherches, 2 avenue Van Becelaere, Brussel 17 (Boitsfort), België. *B*

Van de meeste dezer publikaties zullen binnenkort overdrukken beschikbaar zijn. Men kan deze aanvragen bij het betrokken laboratorium (zie de codeletter) of bij de Administratie van Philips' Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven.

C. S. Aitchison & J. C. Williams: Active reactance compensation of parametric amplifiers.
Electronics Letters **5,** 139-140, 1969 (No. 7). *M*

J. van den Berg & H. J. R. Perdijk (Philips Electronic Components and Materials Division, Eindhoven): Barium carbonate deposits on valve components.
Vacuum **19,** 122, 1969 (No. 3).

G. Blasse: Energy transfer in oxidic phosphors.
Philips Res. Repts. **24,** 131-144, 1969 (No. 2). *E*

R. Boite (Faculté Polytechnique de Mons) **& J. P. V. Thiran:** Synthesis of filters with capacitances, switches, and regenerating devices.
IEEE Trans. **CT-15,** 447-454, 1968 (No. 4). *B*

A. J. Bosman & C. Crevecoeur: Electrical conduction in Li-doped CoO.
J. Phys. Chem. Solids **30,** 1151-1160, 1969 (No. 5). *E*

P. B. Braun, J. Hornstra & J. I. Leenhouts: Automated crystal-structure determination by Patterson search using a known part of the molecule.
Philips Res. Repts. **24,** 85-118, 1969 (No. 2). *E*

J. van den Broek: Optical lattice vibrations and dielectric constant of tetragonal lead monoxide.
Philips Res. Repts. **24,** 119-130, 1969 (No. 2). *E*

H. B. G. Casimir: G. Holst and his ideas on industrial research.
Philips Res. Repts. **24,** 161-167, 1969 (No. 3). *E*

T. Chisholm: An analysis of thermal and space-charge spreading of electron beams from guns of the Pierce type.
Proc. IEEE **57,** 357-358, 1969 (No. 3). *M*

W. A. Crossley, R. W. Cooper, J. L. Page & R. P. van Stapele: Faraday rotation in rare-earth iron garnets.
J. appl. Phys. **40,** 1497-1498, 1969 (No. 3). *E, M*

L. Crousel & J. Neirynck: Polynomial Chebyshev approximations of the ideal filter.
IEEE Trans. **CT-15,** 307-315, 1968 (No. 4). *B*

P. J. Daniel, R. A. Ford & J. M. Schofield: Transistor fabrication using diffusion barriers produced by electron beams.
Electronics Letters **5,** 169-170, 1969 (No. 8). *M*

J. C. Decroly, Y. Genin & J. M. Mouchart: La détermination des orbites de transfert.
Rev. MBLE **11,** 145-158, 1968 (No. 4). *B*

J. A. W. van der Does de Bye: Comment on the application of configuration coordinates to the red emission of gallium phosphide.
J. Phys. Chem. Solids **30,** 1293, 1969 (No. 5). *E*

J. A. W. van der Does de Bye & R. C. Peters: Preparation and properties of epitaxial gallium phosphide grown by HCl-gas transport.
Philips Res. Repts. **24,** 210-230, 1969 (No. 3). *E*

C. Z. van Doorn: Demonstration of electrostatic generator principles.
Amer. J. Phys. **37,** 225, 1969 (No. 2). *E*

D. G. Elson: An analogue equipment for use in production planning.
Operat. Res. Quart. **19,** 175-184, 1968 (No. 2). *M*

N. V. Franssen: Geluidsveldversterking.
Nederlands Akoestisch Genootschap Publ. No. 14, 54-58, 1969. *E*

S. Garbe & G. Frank: Efficient photoemission from GaAs epitaxial layers.
Solid State Comm. **7,** 615-617, 1969 (No. 8). *A*

R. Genève: Introduction à la thermographie médicale.
Acta electronica **12,** 7-19, 1969 (No. 1). *L*

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

J.-M. Goethals: A polynomial approach to linear codes.
Philips Res. Repts. **24,** 145-159, 1969 (No. 2). *B*

C. A. A. J. Greebe & P. A. van Dalen: Ultrasonic amplification by minority charge carriers in piezoelectric semiconductors.
Philips Res. Repts. **24,** 168-200, 1969 (No. 3). *E*

G. Groh: Holographie in der Schwingungstechnik.
VDI-Berichte No. 135, 145-153, 1969. *H*

G. E. G. Hardeman & G. B. Gerritsen: Magnetic resonance in 6H SiC.
Mat. Res. Bull. **4,** S 261-272, 1969 (SiC issue). *E*

J. Hasker: Transverse-velocity distribution for space-charge-limited beam current in an electron gun with rotational symmetry.
Philips Res. Repts. **24,** 231-240, 1969 (No. 3). *E*

K. Herff & E. Roeder: Vorrichtung zur Messung geringer Schichtdicken (in Duits en Engels).
Prakt. Metallogr. **5,** 557-566, 1968 (No. 10). *A*

A. E. Hilling & S. K. Salmon: Intermodulation in common-emitter transistor amplifiers.
Electronic Engng. **40,** 360-364, 1968 (No. 485). *M*

E. P. Honig & J. H. Th. Hengst: Points of zero charge of inorganic precipitates.
J. Colloid Interface Sci. **29,** 510-520, 1969 (No. 3). *E*

E. P. Honig & J. H. Th. Hengst: Temperature dependence of the point of zero charge of AgI.
J. Colloid Interface Sci. **30,** 109-110, 1969 (No. 1). *E*

M. Jatteau: Thermographe fonctionnant à 4 ou 10 microns et permettant le tracé précis des isothermes.
Acta electronica **12,** 21-62, 1969 (No. 1). *L*

P. J. W. Jochems: Geïntegreerde schakelingen, 1. De planaire technologie.
Natuur en Techniek **37,** 173-181, 1969 (No. 5). *E*

M. de Jong & M. G. J. Knapen (Philips Electronic Components and Materials Division, Eindhoven): Cutting of thin carbon films with a CO_2-gas laser, II. Experiments on cylindrical bodies.
Microelectronics and Reliability **8,** 89-90, 1969 (No. 2).

H. Jonker *et al.*: Physical development recording systems:
I. General survey and photochemical principles **(H. Jonker, C. J. Dippel, H. J. Houtman, C. J. G. F. Janssen & L. K. H. van Beek);**
II. Mercury nucleation and the amalgam effect **(H. Jonker, C. J. Dippel, H. J. Houtman, A. Molenaar & E. J. Spiertz);**
III. Physical development **(H. Jonker, A. Molenaar & C. J. Dippel);**
IV. PD photoplating **(H. Jonker, C. J. G. F. Janssen, C. J. Dippel, Th. P. G. W. Thijssens & L. Postma).**
Photogr. Sci. Engng. **13,** 1-8, 33-37, 38-44, 45-49, 1969 (Nos. 1, 2). *E*

W. Kebschull: Die Reflexion trockner und feuchter Straßenbeläge.
Thesis, Berlin 1968. *A*

W. F. Knippenberg & G. Verspui: The influence of impurities on the growth of silicon carbide crystals grown by gas-phase reactions.
Mat. Res. Bull. **4,** S 33-44, 1969 (SiC issue). *E*

W. F. Knippenberg & G. Verspui: The influence of impurities on the growth of silicon carbide crystals by recrystallization.
Mat. Res. Bull. **4,** S 45-55, 1969 (SiC issue). *E*

D. Lamport: Image tubes shaped by computer.
New Scientist **43,** 10 July 1969, feature section, p. 21, 23, 24 (No. 657). *M*

J. Loeckx: Mechanical construction of bounded-context parsers for Chomsky 0-type languages.
Thesis, Louvain 1968. *B*

S. R. Longley: Experimental 4-port *E*-plane junction circulators.
IEEE Trans. **MTT-15,** 378-380, 1967 (No. 6). *M*

J. R. Mansell: Video-frequency light modulator having a wide angular aperture.
Proc. IEE **116,** 691-698, 1969 (No. 5). *M*

R. Memming: Mechanism of the electrochemical reduction of persulfates and hydrogen peroxide.
J. Electrochem. Soc. **116,** 785-790, 1969 (No. 6). *H*

R. F. Mitchell & M. Redwood (Queen Mary College, University of London): The generation of sound by non-uniform piezoelectric materials.
Ultrasonics **7,** 123-124, 1969 (No. 2). *M*

J. Neirynck & Ph. van Bastelaer: A class of filters with optimum transient behaviour.
Rev. MBLE **11,** 159-166, 1968 (No. 4). *B*

D. H. Paul: Use of the complex variable and the bilinear transformation in circuit analysis.
Electronic Engng. **40,** 378-382, 1968 (No. 485). *M*

D. H. Paul: Chebyshev polynomials.
Electronic Engng. **40,** 475, 1968 (No. 486). *M*

W. Schilz: Magneto-acoustic investigation of the Fermi surface and spin splitting of the Landau levels in *p*-type and *n*-type PbTe.
J. Phys. Chem. Solids **30,** 893-901, 1969 (No. 4). *H*

E. Schwartz: Rise time and pulse length limitation for a source with parasitic capacitance and related problems.
IEEE Trans. **CT-16,** 96-98, 1969 (No. 1). *A*

E. Schwartz: Zur Theorie der Anpassung mit zwei Reaktanzen.
Archiv elektr. Übertr. **23,** 169-176, 1969 (No. 4). *A*

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

J. G. Siekman: Cutting of thin carbon films with a CO_2-gas laser, I. Theoretical considerations and experiments on flat plates.
Microelectronics and Reliability **8**, 87-89, 1969 (No. 2). *E*

L. A. Æ. Sluyterman, J. Wijdenes & B. G. Wolthers (Laboratorium voor Structuurchemie, Groningen): The non-essentiality of the N-terminal amino group of papain.
Biochim. biophys. Acta **178,** 392-393, 1969 (No. 2). *E*

F. L. H. M. Stumpers: Doel en structuur van de Internationale Wetenschappelijke Radio Unie.
Ingenieur **81,** ET 80-82, 1969 (No. 20). *E*

T. L. Tansley: Characteristics of GaAs based heterojunction photodetectors.
Proc. 2nd Int. Symp. on GaAs, Dallas, Texas, 1968, p. 222-229. *M*

R. W. Teale (Physics Department, Sheffield University), **D. W. Temple** (Phys. Dept., Sheffield Univ.), **U. Enz & R. F. Pearson:** Infra-red sensitive ferrimagnetics.
J. appl. Phys. **40,** 1435-1441, 1969 (No. 3). *E, M*

H. J. L. Trap: Elektronenleitende Gläser, ihre Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten in der Elektronik.
Sprechsaal für Keramik, Glas, Email, Silikate **101,** 1103-1111, 1114, 1968 (No. 24). *E*

G. Verspui: Nieuwe vormen van koolstof.
Natuur en Techniek **37,** 113-123, 1969 (No. 4). *E*

J. Vlietstra: De APT-post-processor. Een rekenmachineprogramma voor het verwerken van APT-werkstukprogramma's door het APT-computersysteem.
Ingenieur **81,** W 33-39, 1969 (No. 7). *E*

W. L. Wanmaker & J. W. ter Vrugt (Philips Lighting Division, Eindhoven): Luminescence of some gallium-containing compounds.
Philips Res. Repts. **24,** 201-209, 1969 (No. 3).

P. Wodon: Langages de programmation pour le calcul symbolique.
Rev. MBLE **11,** 167-178, 1968 (No. 4). *B*

L. E. Zegers: Common bandwidth transmission of information signals and pseudonoise synchronization waveforms.
IEEE Trans. **COM-16,** 796-807, 1968 (No. 6). *E*

Inhoud van Philips Telecommunication Review **28,** No. 3, 1969:

F. J. Schramel: The DS 714 computer system used as a message switcher (p. 125-134).
H. van Kampen: The type DS 714 computer-based message and data switching system (p.135-146).
C. H. Luitwieler: A computer interface for the ELDO launcher inertial guidance system (p. 148-154).
J. K. A. Poppe: PE-6 negistor system 8TR 321/10 (p. 155-157).

Inhoud van Mullard Technical Communications **10,** No. 99, 1969:

R. J. Hatt, A. E. Jackets & D. B. Jarvis: Four-phase logic circuits using integrated m-o-s transistors (p. 266-276).
J. Merrett: Dynamic braking of d.c. shunt motors (p. 277-284).

Inhoud van Mullard Technical Communications **10,** No. 100, 1969:

K. Wilson: Gunn effect devices and their applications (p. 286-293).
A. Ciuciura: Spark-gaps for protection of radio receivers (p. 294-295).
D. Gent & J. Lammers: Line timebase and e.h.t. trebler for colour tubes (p. 296-301).
W. Ebbinge & D. C. de Ruiter: Transistorised water level sensor (p. 302-304).

Inhoud van Valvo Berichte **15,** No. 1, 1969:

F. Weitzsch: Zur Frage der Farbkorrekturen bei Farbfernseh-Empfängern (p. 1-19).
J. Koch: Berechnung der Wirbelstromverluste in der Wicklung von Schalenkernen mit Luftspalt (p. 20-31).
D. Hellwege: Messung der Wirbelstromverluste in der Wicklung von Schalenkernen mit Luftspalt (p. 32-40).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Register van onderwerpen
Jaargangen 21-30

Het bij elk onderwerp vermelde vet gedrukte getal geeft de jaargang aan, het daarop volgende getal de bladziide. Voor onderwerpen behandeld in de jaargangen **1-20** raadplege men de vroegere 10-jaren-registers, opgenomen aan het eind van de jaargangen **10, 15, 20** en **25**.

Aansmelting vensters voor breed spectraal doorlaatgebied **30**,300
Absorptiewig, cirkelvormige optische **22**,418
Acaricide „Tedion V 18" **21**,242
Afdichting, zie **Rolmembraan**
Afgeschermde ruimte voor microgolfmetingen **23**,189
Afstandsbekrachtiging van speelgoed **24**, 66

Agrobiologisch onderzoek:
„Tedion V 18", proeven met radio-isotoop **21**,242
biologisch evenwicht **23**,105
beschikbaarheid organ. verbindingen in hogere planten **28**, 97
fenolsynthese en fotomorfogenese **28**,105
formulering van pesticiden . **28**,116
Aken, Philipslaboratoria te — en Hamburg **26**,253-344
Akoestiek, zie **Geluid**
Alfa-spectrometrie met halfgeleiderdetectors **30**, 13
Alkalimetalen, eigenschappen oppervlak **30**,229
Ambiofonie **21**, 54
„Amplimat" (belichtingsautomaat röntgendiagnostiek) **27**, 78
„Ampliscoop" (harmonisering röntgenbeelden) **24**,269

Analogon-computer:
voor berekening kleurpunt lichtbron **23**, 89
schrijven van elektronenbanen met weerstandsnetwerk en — **23**,368
Analyse van gassen, zie **Omegatron**
Anomale transmissie van röntgenstraling **29**,116

Antennes:
voor radar (lens van Luneburg) **22**, 37
kleine ferroxcube— voor FM **24**,324
APT-programmeertaal **28**,339
Arbeid, maat voor perceptieve — **24**,362
Argonne, protonensynchrotron . **30**,341
Armaturen, temperaturen in — voor gloeilampen **21**,292
Autokoplichten met jodiumlampen **23**,222
Automatisch lezen van tekens . . **28**,297-303
Automatisch tekenen, zie **Tekenen met computer**
Automatische analyse van microscopische deeltjes **21**,345
Automatisering, zie **Mechanisatie** en **Numerieke besturing**
Autoradio **24**, 29
Auto-versnellingsbak, elektronisch gestuurde **28**,279

Bakens, microgolf— met multireflexieklystron **24**,178
Ballonblaasmachines **22**,333
Bandopnemer voor TV, niet-professionele **26**,221
Bariumtitanaat, PTC-weerstanden van — . . . . . **26**,285-**30**,174 (met rectificatie **27**, 40)
„Barrette" **30**,270
Batterij in de vorm van papier . . **28**,204
Bedrijfsmechanisatie, zie **Mechanisatie**
Beeldbuizen, zie **Televisie, beeldbuizen**

Beeldtransformators en -versterkers:
röntgenbeeldversterker, zie aldaar
met elektrostatische „Zoom"-optiek **25**,254
onderzoek aan — bij Mullard **28**,262
beeldtransformator als fotografische sluiter **30**,246
Belichtingsautomaat voor röntgendiagnostiek **27**, 78
Bewegingstegenkoppeling bij luidsprekers **29**,152
Binaire systemen in fazenleer . . **26**, 12-**26**, 58
Biologisch evenwicht (intreerede Van der Veen) **23**,105
Bioscoopprojector, zie **Filmprojectie**
Bitter-patronen voor onderzoek van omkeerproces magnetisatie . **24**,240
BOL-project van IKO **30**,108
Booglassen van staal (zirkoonbasische elektrode; CO_2-lassen) . . **24**, 14
Boren van diamant met elektronenbundel **28**,275
Boren, kern— met holle polygonale boor **30**,317
Bouwstenen, digitale, zie **Digitale bouwstenen**
Brookhaven, protonensynchrotron **30**,341
Bundelextractie uit cyclotron (Orsay) **23**,397
Bundellichten, automatische registratie van isocandelakrommen . **23**,262
Bundel-plasma-versterkbuizen . . **27**,273

Cadmiumsulfide:
etsputten op — **22**,278
fotogelijkrichtende laag . . **23**,329
monokorrellagen van — . . **29**,246
Cardiografie, zie **Vectorcardiografie**
Cascadegenerator, compacte, voor neutronenbuis (100 kV) **23**,354
CERN-protonensynchrotron . . . **30**,341
CERN-synchrocyclotron . . . **22**,150-**22**,157-**22**,170
Channel multiplier, zie **Elektronenmultiplicatorpijp**
Cinemaprojectie, zie **Filmprojectie**
CO_2-lasers, afgesmolten, voor groot vermogen **28**,193
CO_2-lassen **24**, 20
Coaxiale leiding, microgolfonderdelen gebaseerd op — **28**,312
COBRA, zie **Numerieke besturing**
Communicatie-satellieten-station Goonhilly Down, maser voor — . **26**, 33
Companders met hoge graad van compressie **26**,116

Compressor:
toepassing rolmembranen . . **26**,352
tweetrapscompressor voor heliumliquefactor **30**, 51

Computers:
PASCAL **23**, 1
rekengeluiden van PASCAL . **24**,157
recente ontwikkelingen . . . **26**, 83
beveiliging van informatie bij invoer en transmissie . . . **26**,323
toepassingen:
onderzoek magneetveld isochroon cyclotron . **24**,106 (met rectificatie **24**,260)
reductie snijverliezen van golfkarton **24**,121
potentiaalvelden, elektronenbanen **24**,130
dimensionering luidsprekermagneten **24**,144
oplossen legpuzzel . . . **24**,151
opdampproces van weerstanden **24**,329
regeling luchtverkeer . . **26**,128
bewaking kernreactor . **30**, 48
numerieke besturing, zie aldaar
besturing tekentafel, zie **Tekenen met computer**
zie verder:
Analogon-computer
Perifere apparatuur
Programmatuur
Constante lichtbron, eenvoudige schakeling **21**,246
Contourdepositie **28**,253
Correlatiemetingen ster-interferometer **27**,197-**27**,208
Cuprochloride, kweken van monokristallen **30**,267

Cyclotron:
600-MeV-synchro— CERN:
ontwerp **22**,150
hoogfreq.-installatie . . **22**,157
stemvork-modulator . . **22**,170
160-MeV-synchro— met bundelextractie te Orsay . . . **23**,397
onderzoek magneetveld van isochroon — . . . . . **24**,106 (met rectificatie **24**,260)
ontwikkeling (intreerede Verster) **27**, 29

Damp, verhitten in — bij regelbare druk en temperatuur . . . **24**,238
Datatransmissie met digitale schakelingen **30**, 71

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Dataverwerking, zie **Computers** en **Perifere apparatuur**
Dauwpuntsbepaling, apparaat met Peltier-koeling **21**,211
Deeltjes, automatische analyse van microscopische — **21**,345
Defford, radio-interferometer . . **27**,317 (met rectificatie **28**, 47)
Deltamodulatie **25**,174
Deltawerken, onderzoek van zandtransport met radio-isotoop . . **21**,161
Depositie met elektronenbundel . **28**,272

Diamant:
richten van — voor gereedschap **21**,156
boren van — met elektronenbundel **28**,275
Dichtheidsmeting aan kleine deeltjes **28**, 14
Diëlektrische leidingen voor mm-golven . . . . . **26**,202 / **26**,211
Diffractometrie, zie **Röntgen**
Diffusie-onderzoek met radio-isotopen, slijpmachientje voor — . **25**,103

Diffusie bij transistorfabricage:
legeer-diffusiemethode . . **24**,229 / **28**,148
anomale diffusie in Si . . . **28**,249

Digitale bouwstenen:
systeem met 1 actieve en 1 passieve logicaschakeling als basis (NOR en EN) . . . **26**,331
10-reeks en 20-reeks **28**, 48
toepassing van 10-reeks en 20-reeks **29**, 19
Digitale richtingzoeker **28**,327
Digitale schakelingen voor datatransmissie **30**, 71
Digitaal stemtoestel voor muziekinstrumenten **26**,338
Diktemeting met laserlicht . . . **27**,183
Dimmen van „TL" lampen . . . **27**,263

Dislocaties:
Ge-kristallen zonder — . . **21**,336
invloed in metalen, halfgeleiders en ionenkristallen . . **22**,406
projectietopogrammen van — **23**,192
aantonen van — met anomale röntgentransmissie **29**,116
Dodewaard, kernreactor: bewaking regelstaafbesturing **30**, 48
DONDERS, elektronisch meetsysteem voor menselijke reacties . **24**,372
Donders, F. C., onderzoek reactietijden door — **24**,383
Donker, zien in het — . . . . **25**,254 / **28**,262
Doorvoerovens voor staafmateriaal **27**,342
Dosismeters voor therapie en diagnostiek **23**, 47

Doteren:
bereidingsmethodes Ge en Si **21**,189
inhomogeniteiten in Ge en Si **25**,107
bij epitactische groei van Si- en Ge-lagen **26**,193
anomale diffusie bij — van Si **28**,249
legeer-diffusiemethode (voor p.o.b.-transistors) . . . . **24**,229 / **28**,148

Draad:
lak—, fabricage en onderzoek **23**,358
orthocyclisch wikkelen . . . **23**,381
„Thermoplac" — **23**,387
diktemeting met laserlicht . **27**,183
Draadloos bekrachtigd speelgoed . **24**, 66
Draaggolftelefonie: transistorisering, conclaveprincipe **26**,106
Draaibank, precisie—, met hydrostatische lagering en aandrijving . **30**,121
Drukker met puntenmozaïek . . **29**,213
Druksinteren, continu **29**, 45

Dunne lagen:
kleursplitsende spiegels met — **24**,261
warmte-isolatie van natriumlampen **26**,270
microfractografie van — . . **27**,115
—transistor **27**,160
indiumoxidefilter voor lagedruk-natriumlampen **29**, 17
zie verder **Opdampen**
Duphar, zie Philips-Duphar
„Duphaston"-molecuul, stereo-afbeelding door computer **29**,112
„Duvadilan" (vaatverwijdend middel) **24**, 73

Eenzijbandmodulatie **25**,317
Elektreet met fotogeleider . . . **23**,329
Elektroluminescentie **23**,277
Elektrolytcondensatoren, non-polaire **29**, 37
Elektrolytische trog, schrijven van elektronenbanen **22**,257
Elektrometer, trilplaatcondensator voor — **25**, 77

Elektromotoren:
kleine — met ferroxdure-rotor **26**,309
kleine inductiemotoren, regeling met thyristors **28**, 1
lilliput-motor voor onderzoek gezichtszin **28**,226
kleine gelijkstroommotor met elektronische commutatie . **30**, 7
elektrostatische motoren . . **30**,183

Elektronenbanen:
schrijven van — met elektrolytische trog **22**,257
schrijven van — met weerstandsnetwerk en analogon-computer **23**,368
berekening van — met digitale computer **24**,130

Elektronenbuizen:
microfonie van — **22**, 80
zie verder o.a.:
Fotomultiplicators
Schijftriodes

Elektronenbundel:
in plasma **27**,273
chemische depositie met — . **28**,272
boren van diamant met — . **28**,275

Elektronenmicroscoop:
stereofotografie met — . . . **27**,217
Lorentz-microscopie **29**,227
met TV-keten **29**,302
EM 300 . . . . . **29**,380
opnamen met —:
whiskers van SiC . . **24**,175 / **26**,232 / **29**,273
buigingseffect bij — . . **25**, 55
„Ticonal" **25**,201
matteren van glas . . . **29**,146

Elektronenmultiplicatorpijp:
grondslagen **28**,256
pijpenplaatjes **30**,257
Elektronentechniek in de houtindustrie **23**,169
Elektronische rekenmachines, zie **Computers**
Elektrostatisch gefocuss. „Plumbicon" buizen **28**, 64
Elektrostatische motoren **30**,183
Ellipsometrie **29**,139
Energiepapier **28**,204
Energiespectra, driedimensionale . **27**,108
Enzym, substraat en produkt . . **27**, 57

Etsputten:
dislocatieonderzoek met — . **21**,336
op CdS **22**,278
op ZnS **24**, 68
Experimenten, statistische verwerking (intreerede Hamaker) . . **22**,113

Faraday-kooi **23**,189
Fazefouten, hoorbaarheid van — . **25**, 74

Fazenleer:
unaire systemen **26**, 12
binaire systemen . . . . **26**, 12 / **26**, 58
ternaire systemen **27**,228
Fenolsynthese en fotomorfogenese **28**,105

Ferrieten:
onderzoek monokristallen . . **28**,235
spoelen met ferrietkern . . **28**,284 / **28**,287
ferroxplana, kristalgroei . . **28**,375
zie verder **Ferroxcube** en **Ferroxdure**

Ferroxcube:
met rechthoekige hysteresislus, omkeerproces magnetisatie **24**,240
inductieve antenne voor FM . **24**,324
voor protonensynchrotrons . **30**,322

Ferroxdure:
berekening luidsprekermagneten van — **24**,144
in kleine elektromotoren . . **26**,309
Ferroxplana, microscopische opname kristalgroei **28**,375

Filmprojectie:
met flitsende lamp (FP 20 S met SPP 800 W) **21**,121
projector van vereenvoudigde constructie (FP 20) **21**,131
Filters, actieve laagfrequent— zonder spoelen **25**,376
Fizeau-lijnen bij interferentiespiegel **23**,396

Flitslampen:
ontladings— (elektronische —) **22**,389
verbrandings— met fluorreacties **26**,279
Fluorchemie **26**,277
Fluorescentielampen, zie „TL" **lampen**
Fluorescentiescherm voor kleurentelevisie . . . . . **23**,133 / **27**, 35 (met rectificatie **23**,200)
Fonetisch onderzoek **24**,348
Formulering van pesticiden . . . **28**,116
Fosforen voor kleuren-TV . . . **27**, 35
Fotodiodes van GaP **26**,303

Foto-emissie:
van halfgeleiders **29**, 54
van alkalimetalen **30**,229

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Fotogeleiding:
fysische grondslagen: contacten op halfgeleiders; recombinatieproces, gevoeligheid, responsiesnelheid; inhomogeniteitseffecten . 25,262 26,235 29,230
fotoweerstanden van InSb . 22,357
fotogelijkrichtende CdS-laag voor leesmatrix 23,329
monokorrellagen 29,246
voor waarneming in infrarood 30,270
trefplaten voor infrarood-opneembuizen 30,277
„Plumbicon" opneembuizen, zie aldaar

Fotografie:
flitslampen, zie aldaar
sluiters voor ultrasnelle — en serie— 28,262
ultrasnelle — 30,246
Fotomaskers voor geïntegreerde schakelingen 30, 29 30, 57
Fotometer, automatische digitale, voor gloeilampen 23,254
Fotomorfogenese 28,105

Fotomultiplicators:
gebruik voor lichtstipaftasting (50 AVP) 21,254
overzicht 29,276
(met rectificatie 29,305)
toepassing transfertechniek hybridische — 30,241
met pijpenplaatje . . . . .
Fotosynthese 27,245
Fotoweerstanden, zie **Fotogeleiding**
Freesbank, zie **Numerieke besturing**
Frequentie-analoge signalen, omzetting in — 29,194

Frequentiemodulatie:
opwekken met cm-golftriodes 22, 31
FM-ontvangst met sterke storingen 22,219
FM-ontvangst langs verschillende wegen 22,374
ferroxcube-antenne voor FM-ontvangers 24,324
Fytofarmaceutisch onderzoek, zie **Agrobiologisch onderzoek**

Galliumfosfide:
P-N-luminescentie 22,384 25, 56
lichtbronnen en fotocellen van — 26,303
Gammaspectrometrie bij opsporen van mineralen 30,109

Gammastraling:
gevoelige monitor voor — . 26, 98
zie ook **Stralingsmetingen**
Gasanalyse, zie **Omegatron**
Gaslagers 25,302
(met rectificatie 25,347)

Gasontladingsbuizen:
indicatorbuis voor teller . . 21,233
koudekatodebuis voor vlambeveiliging 29,260

Gasontladingslampen:
flitsende superhogedrukkwiklamp 21,121
ontladings-flitslampen 22,389
met metaaljodiden 29,361
zie verder **Natriumlampen** en **„TL" lampen**
Gas-smering 29,192

Gedrukte bedrading:
in autoradio 24, 29
mechanische montage op — (TV-toestel) 24, 45
slagmontage op — 27, 23

Geheugens:
geheugenwiel voor TV- en röntgenbeelden 22, 1
ontwikkeling voor computers 26, 83
in autom. telegraafcentrales . 26,143
magnetisch-band— voor telegraaftekens, met statische aflezing 26,154
parameters van NiFe-lagen voor snelle — 28,288

Geïntegreerde schakelingen:
algemene beschouwing . . . 27,139
opgedampte schakelingen . . 27,141
kristalschakelingen 27,152
dunnelagentransistor 27,160
afstembare — 27,283
toepassingen contourdepositie (o.a. voor MOS-transistors) 28,253
automatisch tekenen van maskers voor — 30, 29
repeteercamera voor fabricage fotomaskers voor — . . . 30, 57
MOS-tetrode 30,138

Geluid:
moderne —techniek (beheersing akoestiek, ambiofonie) . 21, 54
—spectroscoop met elektronische aftasting 21,360
stereofonische radio-omroep 26, 69 27, 50
hoortoestellen (achter het oor gedragen) 27,186
zie verder **Luidsprekers**

Gelijkrichters:
bestuurbare Si— in omzetters 23,255
voor 2000 V met buizen en transistors 25, 93
(met rectificatie 25,276)
Gelijkstroommotor met elektronische commutatie 30, 7
Gelijkstroom - wisselstroomomzetters met bestuurbare Si-gelijkrichters 23,255

Germanium:
bereidingsmethodes (zonesmelten, drijvende kroes) . 21,189
dislocatievrije —kristallen . 21,336
inhomogeniteiten in gedoteerde Ge- en Si-kristallen . 25,107
gasdotering epitactisch — . . 26,193
onderzoek aan grensvlak met water 26,294
zie verder **Transistors**

Geschiedenis:
toepassing van glas 22,294
stralingsovens 23,165
ontstaan Philips' Gloeilampenfabrieken 23,202
rekenmachine van Blaise Pascal 24,102
spreekmachine van Von Kempelen 24,354
meting menselijke reactietijden 24,383
50 jaar halfwattlamp 25, 2
50 jaar fysisch onderzoek bij Philips 25,159
40 jaar vastestofchemie bij Philips 25,183
begintijd telegrafie 26,175
bestrijding van plagen in landbouw 28,125
Getter-ionenpomp 22,272
Gezichtszin, motortje voor experimenten 28,226

Glas:
losmaakbare —verbindingen 22, 61
historie toepassing van — . 22,294
structuur (o.a. invertglazen) 22,312
meten en regelen bij fabricage van — 22,324
ballonblaasmachines 22,333
onderzoek materiaal voor —metaalaansmeltingen . . . 22,351
elektronenmicroscopische opname van breukvlak . . . 26,102
matteren van — 29,146

Gloeilampen:
automatiseren van spiraalwikkelmachine 21,302
ballonblaasmachines voor — 22,333
ontstaan —fabriek in 1891 . 23,202
automatische digitale fotometer voor — 23,254
schokbeproeving van — . . 24,193
50 jaar — met gasvulling (halfwattlamp) 25, 2
selectieve stralers voor — . 25,349
halogeenlampen, zie aldaar
Golfkarton, reductie snijverliezen met computer 24,121

Golfpijpen voor mm-golven:
richtingsisolatoren 22, 16
apparatuur voor 2-mm-golven 22,122 22,229
overmaatse — 29, 87
Goonhilly Down, maser voor — . 26, 33
Goud-nuggets, kweken van — . 30, 93
Grafiet, pyrolytisch 28,133
Grammofoonplaten, snijsnelheid stereo— 23,149
(met rectificatie 23,200)
Granaten, onderzoek monokristallen van — 28,235

Halfgeleiders:
voor stralingsdetectors . . . 27,327 30, 13
foto-emissie van — 29, 54
optisch onderzoek aan oppervlakken van — 29,133
zie ook:
Fotogeleiding
Galliumfosfide
Germanium
Silicium

Halogeenlampen:
gloeilampen met jodium- houdend vulgas 23,217 23,222
transportreacties met fluor . 26,280
gloeilampen met broom- en met chloorhoudend vulgas . 27,132
Hamburg, Philipslaboratoria te Aken en — . . . . . 26,253 -344
Harpkatode 26,376
Hartfrequentie, continue meting van — 21,297
Heetgasmotor, toepassing rolmembraan in — 26,350

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Heliumliquefactor met koudgaskoelmachines:
constructie en eigenschappen 29,205
warmtewisselaar voor — . . 29,162
compressor voor — 30, 51
Herbiciden, zie **Agrobiologisch onderzoek**
Holst, prof. dr. G., in memoriam . 29,301

Hoogfrequentverhitting:
toepassing in houtindustrie . 23,170
regelen met schuifspoel . . 27,110
Hoogspanningsgenerator, compacte 100-kV— voor neutronenbuis 23,354
Hoortoestellen, achter het oor gedragen 27,186
Hormonale werking, retro-steroiden met —. 28, 74
Houtindustrie, elektronentechniek in — 23,169
Hydraulische servomotor 24,311
Hydrostatische lagering en aandrijving bij precisiedraaibank . 30,121
Hydrothermale kristalgroei en synthese 30, 93

Implosievaste beeldbuis 25,146
Impulsmagnetron, zie **Magnetrons**
Indicatorbuis voor decimale telschakelingen met transistors . . . 21,233
Indiumantimonide voor fotoweerstanden en Hall-generatoren . . 22,357
Indiumantimonide en -arsenide voor infraroodwaarneming . . . 30,270
Indiumoxidefilter in lagedruknatriumlampen 29, 17
Inductiemotoren, regeling met thyristors 28, 1
Informatieverwerking, zie **Computers** en **Perifere apparatuur**

Infrarood:
reflexie in — als onderzoekmethode 29,133
waarneming in het verre — . 30,270
—televisie 30,277
thermografie bij 4 en 10 μm 30,285
objectieven voor — 30,298
Inhaalbuizen, zie **Klystron**
Inhomogeniteiten in gedoteerde Ge en Si-kristallen 25,107
Insekticiden, zie **Agrobiologisch onderzoek**
Interferentiespiegels voor kleurscheiding 24,261

Interferometrie:
ster-interferometer Narrabri 27,197; 27,208
radioastronomische interferometer Defford 27,317
(met rectificatie **28,** 47)
richtingsbepaling met multipele interferometer 28,327
voor verplaatsingsmetingen 30,153; 30,164
Intersynchronisatie van televisiecamera's 30,309

Intreeredes:
Bremmer 22, 69
Diemer 23,277
Hamaker 22,113
Oosterkamp 24, 1
Polder 21,330
Van der Veen 23,105
Verster 27, 29
Viersma 24,165

I.P.O. (Instituut voor Perceptie Onderzoek) 24,337-388
Isocandelakrommen, automatische registratie van — 23,262
Iso-*Q*-diagrammen van spoelen . 28,287
Isotopen, zie **Radio-isotopen**
Isoxsuprine („Duvadilan") . . . 24, 73

Jodide-ontladingslampen 29,361

Katodes:
met geringe thermische traagheid (harpkatode) 26,376
naleverings— met osmium . 27,123
oxidekatodes, zie aldaar

Katodestraalbuizen:
meting intensiteitsverdeling lichtstip 25, 29
zie ook **Televisie, beeldbuizen**
Kernboren met polygonale boor . 30,317
Kernfysica, technische toepassingen (intreerede Oosterkamp) . 24, 1

Kernreactoren:
suspensiereactor van KEMA:
motivering van keuze . . 21, 85
meting en regeling werkparameters 21, 98
meting neutronenflux . 21,136; 21,147
beveiligingsschakeling . . 21,151
reactor Dodewaard, bewaking regelstaafbesturing 30, 48
Kernspinresonantie 21,278
Kick-sorter, weergave spectrum . 27,108

Kleurentelevisie:
lichtstipaftaster voor — . . . 21,251
(met rectificatie **21,**344)
experimenteel fluorescentiescherm voor beeldbuis . . . 23,133
(met rectificatie **23,**200)
kleursplitsend prisma 24,261
nieuwe fosforen voor — . . . 27, 35
overbrengingssystemen . . . 27,169
camera met „Plumbicon" buizen 28,346
vertragingslijn voor PAL-ontvangers 29,251
draagbare camera met kleine „Plumbicon" buizen 29,333
ontmagnetiseren beeldbuis . . 29,378
Kleurpunt, analogon-rekenmachine voor — van lichtbron 23, 89

Klystron:
—vermenigvuldiger, 0,8 mm golflengte 26,370
multireflexie— voor microgolfbakens 24,178
eenvoudig reflexie—, 8 mm golflengte 27,299
reflexieklystrons voor 4 en 2,5 mm golflengte 21,225
reflexieklystron voor 1,5 mm golflengte 28,186
Koolboogbeeldoven voor zonesmelten van oxiden 23,143
Koppelmeter, gevoelige, voor hoge frequenties 27,350
Koudekatodebuis voor vlambeveiliging 29,260

Koudetechniek:
sneeuwafscheider voor vloeibareluchtinstallaties 23, 59
(met rectificatie **23,**420)
produktiecentrum vloeibare stikstof 25,348
koudgaskoelmachine voor 20 °K en lager 26, 1
kryogene produktie ultrazuivere waterstof 26, 27
industriële koudgaskoelmachine met hydraulische zuigeraandrijving 26,355
Peltier-koeling 27, 1
smoorejecteur 28,145
snelle kryopomp-opstelling met tweetraps-koudgaskoelmachine 28,365
warmtewisselaar met hoog thermisch rendement 29,162
heliumliquefactor met koudgaskoelmachines 29,205; 30, 51

Kristallen:
optrekken van — 21,189; 21,336; 25,107
roosterfouten in ionen— . . . 22,406
groei van — door chemische transportreacties 26,283
kristalchemie en magnetisme van oxidische materialen (kristalveldtheorie; spinelstructuren) 28, 16; 28, 26
groei van — door transportreactie met alternerende temperatuurgradiënt 28,222
mono— van ferrieten en granaten, onderzoek 28,235
anomale röntgentransmissie door perfecte — 29,116
hydrothermale groei 30, 93
structuurbepaling:
met röntgenstralen . . . 22,135
met neutronen 23, 33
(met rectificatie **23,**168)
autom. monokristaldiffractometer PAILRED 29,169; 29,180
zie verder **Germanium** en **Siliciumcarbide**
Kristalschakelingen 27,152
Kryopomp-opstelling voor ultrahoog vacuüm 28,365
Kwaliteitsfactor van ferrietkernspoelen 28,287

Kwiklampen:
lagedruk— met fluorescentie, zie „**TL**" **lampen**
flitsende superhogedrukkwiklamp 21,121

Laboratoria, zie **Research bij Philips**
Lage temperatuur, onderzoek vaste stof bij — 22,193; 22,246; 22,280

Lagers:
magnetisch aslager 22,238
zweeflager met smeermiddel . 25,296
luchtlagers (gaslagers) 25,302
(met rectificatie **25,**347)
spiraalgroeflagers 25,308
(met rectificatie **25,**347)
spiraalgroeflager voor doorgaande as, met vetsmering . 27,130
smering met gas of damp . . 29,192
spiraalgroeflager van vliegwiel voor ruimtevoertuigen 30, 2
hydrostatische lagering precisiedraaibank 30,121

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Lakdraad, fabricage en onderzoek **23**,358
Lampen, zie:
Gasontladingslampen
Gloeilampen
Kwiklampen
Natriumlampen
Landbouw, historie plagenbestrijding **28**,125

Lasers:
kleine stabiele gaslaser . . . **24**,217
diktemeting met laserlicht . . **27**,183
afgesmolten CO_2-laser voor groot vermogen **28**,193
verplaatsingsmetingen met — **30**,164
Lassen, boog— van staal (zirkoonbasische elektrode; CO_2-lassen) . **24**, 14
Leesmatrix, fotogelijkricht. laag . **23**,329
Legeer-diffusiemethode (p.o.b.-transistors) **24**,229 **28**,148
LEP . . . . . **30**,217 -318
Levitatie, toepassing voor vacuümmeter **30**,236
Lezen, automatisch — van tekens **28**,297 **28**,303
Lichtstipaftaster voor kleurentelevisie **21**,251
(met rectificatie **21**,344)
Lichtverdeling, meting **23**,262
Lichtversterking, grondslagen . . **28**,266
Lineaire elektronenversnellers voor materiaalonderzoek (4-MeV-röntgenstralen) **23**,309
Lineaire programmering **24**,121
Lintleiding als basis voor microgolfonderdelen **28**,312
L-katode in magnetrons **21**, 1 **23**,302
Logicaschakelingen, snelle, met gering energieverbruik **29**,371
Lopendegolf-oscilloscoop **30**,261
Lorentz-microscopie **29**,227
Luchtlagers **25**,302
Luchtsplitsingsinstallatie **25**,348
Luchtverkeer, regeling met computer **26**,128
Lucifersdoosjes, keuring fineer . . **23**,174

Luidsprekers:
metingen aan — **21**,368
berekening van ferroxdure-magneten voor — **24**,144
bewegingstegenkoppeling . . **29**,152

Magneten, supergeleidende . . . **29**,317

Magnetische materialen:
bepalen van magnetische grootheden door verplaatsingsmetingen **25**,119
snelle nauwkeurige metingen aan kleine monsters (vibratiemethode) **25**,139
met $(BH)_{max}$ van 18,5 miljoen gauss oersted **29**,376
zie verder:
Ferrieten
Ferroxcube
Ferroxdure
„Ticonal"

Magnetische registratie:
geheugenwiel voor televisiebeelden **22**, 1
video-bandopnemer voor studiokwaliteit **24**, 84
model 5000:1 voor onderzoek van — **25**,365
in telegrafie **26**,154
niet-professionele video-bandopnemer **26**,221

Magnetische resonantie:
kernspinresonantie **21**,278
dubbele — **24**,201

Magnetisme:
kristalchemie en — **28**, 16 **28**, 26
onderzoek — van ferrieten en granaten **28**,235
onderzoek domeinstructuur (Lorentz-microscopie) . . . **29**,227
Magnetronfornuis **22**, 99

Magnetrons:
serie impuls— voor 3-cm- tot 4-mm-golven **21**, 1
met naleveringskatode **23**,302
impuls— voor 2,5 mm golfl. . **25**,129
voor radar met verspringende frequentie **28**,333
Manometer, Pirani— tot 1000 torr en hoger **30**,170

Masers:
vastestofmaser voor satellietstation Goonhilly Down . . **26**, 33
voor radioastronomie (interferometer Defford) **27**,317
(met rectificatie **28**, 47)
fysisch onderzoek aan materialen voor . . . . — . . **28**,246
Maskers voor geïntegreerde schakelingen **30**, 29 **30**, 57
Massaspectrometer voor analyse van vastestofoppervlakken . . . **27**,348
Materiaalonderzoek met 4-MeV-röntgeninstallatie **23**,309
Matteren van glas **29**,146

Mechanisatie:
automatisering van spiraalwikkelmachine **21**,302
ballonblaasmachines **22**,333
automatische digitale gloeilampenfotometer **23**,254
automatische registratie van isocandelakrommen **23**,262
mechanische montage van TV-toestellen **24**, 45
trilvullers **24**, 88
slagmontage **27**, 23
wervelstroomkoppeling . . . **27**, 41
zie verder **Numerieke besturing**
Mechanische spanningen in glas, onderzoek **22**,351
Meetleiding, symmetrische, voor u.k.g. **21**,112

Meet- en regeltechniek:
regeling van werkparameters suspensiereactor KEMA . . **21**, 98
regeling van temperatuur in glasoven **22**,324
theorie van regelkringen met lineaire elementen **23**, 79
kringversterking en stabiliteit **23**,114
niet-lineair registreertoestel in regelkring **23**,159
industriële apparatuur met digitale bouwstenen **29**, 19
methode met frequentie-analoge signalen **29**,194
Membraanzaagmachine **30**,315
Micro-elektronische bewerking . . **28**,272
Microfonie van elektronenbuizen **22**, 80
Microfoonopstellingen **21**, 54
Microfractografie van dunne lagen **27**,115

Microgolven:
afgeschermde meetruimte . . **23**,189
bakens met multireflexieklystron **24**,178
leidingen voor oppervlakgolven **26**,202 **26**,211
reeks onderdelen op basis van coaxiale leiding en lintleiding **28**,312
golfpijpen voor mm-golven, zie aldaar
zie verder:
Klystron
Magnetrons
Radar
Ruis
Schijftriodes
Microvonkverspaning **30**,200
Mineralen, opsporen met neutronen **30**,109

Modulatiemethodes:
overzicht (symposiumvoordracht) **25**,171
„compatible" eenzijbandmodulatie **25**,317
frequentiemodulatie, opwekken met cm-golftriodes . . **22**, 31
Monokorrellagen **29**,246
Monokristallen, zie **Kristallen**
Monolithische schakelingen . . . **27**,152
Montage op gedrukte bedrading **24**, 45 **27**, 23
Mortier van SiC **26**,368
Mössbauer-spectra **28**, 37
MOS-tetrode **30**,138
MOS-transistors, geïntegr. complementaire paren **28**,254

Motoren:
toepassing rolmembraan in heetgasmotor **26**,350
elektromotoren, zie aldaar
Mozaïekdrukkers voor computers e.d. **29**,213
Mullard, research in —laboratorium . . . . . **28**,229 -332
Multiplicatorbuizen, zie **Fotomultiplicators**
Multiplicatorpijp voor stralingsdetectie **28**,256
Multireflexieklystron voor microgolfbakens **24**,178
Muziekinstrumenten met digitaal voortgebrachte intervallen . . . **26**,338

Naleveringskatodes:
toepassing in magnetrons . . **21**, 1 **23**,302
met osmium **27**,123
Narrabri, ster-interferometer . . **27**,197 **27**,208

Natriumlampen:
nieuwe mogelijkheden van constructie **23**,226
voor wegverlichting **23**,239
warmte-isolatie van — **26**,270
lagedruk— met indiumoxidefilter **29**, 17
Natuurkundig Laboratorium te Eindhoven . . . . . **25**,157 -240
Navigatie, traagheids— **29**, 69
Neoninstallaties, parasitaire capaciteiten in — **21**,200
(met rectificatie **21**,344)

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Neutronen:
—diffractie 23, 33
(met rectificatie 23,168)
meetmethodes —flux bij suspensiereactor . . . . 21,136 / 21,147
afgesmolten —buis 23,341
opsporen mineralen met — 30,109
Nikkel-ijzer-lagen voor snelle geheugens 28,288
„Nimrod", protonensynchrotron . 30,341
Noëmatachograaf 24,383
Non-polaire elektrolytcondensatoren 29, 37
NTSC-systeem voor kleuren-TV . 27,169

Numerieke besturing:
van gereedschapswerktuigen (openbare les Viersma) . . . 24,165
24,289
van contourfreesbank . . . 24,298
24,311
met kleine computer COBRA 27,285
APT-taal voor — 28,339
zie ook **Tekenen met computer**

Omegatron:
voor kwantitatieve gasanalyse 22,199
restgasonderzoek aan beeldbuizen 23, 92
(met rectificatie 23,168)
Onkruidbestrijding, zie **Agrobiologisch onderzoek**
Ontladingslampen, zie **Gasontladingslampen**
Ontmagnetiseren van kleurenbeeldbuis 29,378
Oosterhuis, dr. E., in memoriam . 27,121

Opdampen:
van cirkelvormige absorptiewig 22,418
van weerstanden 24,329
van geïntegreerde schakelingen 27,141
techniek voor dunne en dikke lagen 28, 61
parameters van NiFe-lagen voor snelle geheugens . . . 28,288
Operations Research 25, 65
Opneembuizen voor televisie, zie **„Plumbicon" buizen**
Oppervlakgolven bij zeer hoge frequenties, leidingen voor — 26,202 / 26,211

Oppervlakken:
grensvlak germanium-water . 26,294
analyse van vastestof— in massaspectrometer . . . 27,348
optisch onderzoek aan halfgeleider— 29,133
onderzoek — van alkalimetalen 30,229
Opto-akoestische correlator voor radar 28,318

Opto-elektronica:
intreerede Diemer 23,277
lichtbronnen en fotocellen van GaP 26,303
Orsay, 160-MeV-synchrocyclotron 23,397
Orthocyclisch wikkelen van spoelen 23,381
Oscillator, niet-lineair belastbare l.f.— met zeer kleine vervorming 25, 20
Oscilloscopie van snelle verschijnselen 30,261
Osmiumkatodes 27,123
Otten, ir. P. F. S., in memoriam . . 30, 1
Ovens, doorvoer—, voor staafmateriaal 27,342
Overmaatse golfpijpen voor mm-golven 29, 87

Oxidekatodes:
voor belasting van 1-2 A/cm². 23, 21
met halfwattgloeidraad . . . 23, 24
Oxiden, zonesmelten van — . . . 23,143
Oxidische materialen, kristalchemie en magnetisme van — 28, 16 / 28, 26

PAILRED:
korte beschrijving 27, 48
principe 29,169
schakelingen voor automatische besturing 29,180

PAL-systeem voor kleuren-TV:
vergelijking met andere systemen 27,169
vertragingslijn voor — 29,251

Parametrische versterkers:
eenvoudige experimenten . . 21,172
ruisarme — 28,304
PASCAL, elektronische digitale rekenmachine 23, 1

Peltier-koeling:
overzicht 27, 1
toepassing in dauwpuntsapparaat 21,211

Perceptie:
Instituut voor — Onderzoek 24,337
toonhoogtegewaarwording . . 24,341
fonetisch onderzoek 24,348
onderzoek visueel zintuigsysteem 24,355
maat voor perceptieve arbeid 24,362
elektronisch meetsysteem voor menselijke reacties 24,372
geschiedenis van meting reactietijden 24,383
hoorbaarheid van fazefouten 25, 74
lilliput-motor voor onderzoek gezichtszin 28,226

Perifere apparatuur van computers:
problemen en ontwikkelingstendensen 26,314
snelle ponsbandlezer 28,161
automatisch lezen . . . . 28,297 / 28,303
snelle drukkers 29,213
Pesticiden, zie **Agrobiologisch onderzoek**
Philips-Duphar . . . . . 28, 73 / -132
Pirani-manometer tot 1000 torr en hoger 30,170
Plagenbestrijding in landbouw, historie 28,125
Planten, zie **Agrobiologisch onderzoek**
Plasma, versterkbuizen met elektronenbundel in — 27,273

„Plumbicon" televisie-opneembuizen:
constructie . . . . . 24, 64 / 25,277
met verhoogde gevoeligheid voor rood licht 26, 55
vergelijking met andere opneembuizen 27, 93
experimentele elektrostatisch gefocusseerde — 28, 64
toepassing in kleurentelevisiecamera 28,346
toepassing bij elektronenmicroscoop 29,302
voor draagbare kleurentelevisiecamera 29,333
P-N-luminescentie in GaP . . . 22,384 / 25, 56
P.o.b.-transistors . . . . . 24,229 / 28,148
Pockels-effect 30,302
Pol, Balth. van der, wetenschappelijk werk van — 22, 44
Polytypie van SiC 30, 36
Ponsbandlezer voor 2500 tekens per seconde met stoppen-op-het-teken 28,161
„Posyn", „Potermo" en „Povin" draad 23,358

Potentiaalverdeling:
bepaling met weerstandsnetwerk 21, 11
bepaling met digitale rekenmachine 24,130
Precisiedraaibank met hydrostatische lagering en aandrijving . . . 30,121
Priemgetallen, berekening met rekenmachine 24,157
Princeton, protonensynchrotron . 30,341
Prisma voor kleurscheiding in kleurentelevisie 24,261

Programmatuur voor computers:
berekening verkeerslichtensequenties 27,302
APT-programmeertaal . . . 28,339
grondslagen — 29,344
tekenen van maskers voor geïntegreerde schakelingen . 30, 29
Projectie van film, zie **Filmprojectie**

Protonensynchrotrons:
ferroxcube voor — 30,322
vijf — (AGS, CPS, ZGS, Nimrod, PPA) 30,341

PTC-weerstanden:
van $BaTiO_3$ 26,285
(met rectificatie 27, 40)
toepassing als thermostatische verwarmingselementen . . . 30,174
Pupilreflex 24,355
Puzzel, oplossen met PASCAL . . 24,151
Pijpenplaatjes, elektronenmultiplicator— 30,257
Pyrolytisch grafiet 28,133

Radar:
installatie voor 8-mm— . . . 21, 41
antenne met snel draaiende bundel (Luneburg-lens) . . . 22, 37
met 4-mm-golven 25,241
ultrasone — 28,278
opto-akoestische correlator . 28,318
met verspringende frequentie 28,333

Radioastronomie:
75-cm-ontvanger voor — . . 21,313
(met rectificatie 22, 79)
masers voor interferometer . 27,317
(met rectificatie 28, 47)
Radiogolven, onderzoek atmosfeer met — (intreerede Bremmer) . . 22, 69

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Radio-isotopen:
onderzoek zandtransport Deltawerken met — 21,161
proeven met „Tedion V 18". . 21,242
slijpmachientje voor diffusieonderzoek met — 25,103
Radio-omroep, stereofonische . 26, 69 / 27, 50

Radio-ontvangtoestellen:
transistor-autoradio met druktoetsafstemming 24, 29
kleine ferroxcube-antenne voor FM-ontvangers 24,324
R.A.M.P.-systeem voor traagheidsnavigatie 29, 69
Randapparatuur computers, zie **Perifere apparatuur**
Raster, verplaatsingsmetingen met behulp van — 30,153

Reactietijden, menselijke:
meetsysteem DONDERS . . 24,372
geschiedenis van meting . . . 24,383
Reflexieklystrons, zie **Klystron**
Regelstaafbesturing van kernreactor Dodewaard 30, 48
Regeltechniek, zie **Meet- en regeltechniek**
Rekenmachine van Blaise Pascal . 24,102
Rekenmachines, elektronische, zie **Computers**
Repeteercamera voor maken van fotomaskers 30, 57

Research bij Philips:
in Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven . . . . 25,157 -240
in laboratoria te Aken en Hamburg . . . . . 26,253 -344
bij Philips-Duphar . . . . 28, 73 -132
in Mullardlaboratorium (MRL) . . . . . 28,229 -332
in laboratorium te Limeil-Brévannes (LEP) . . . . 30,217 -318
Residu bij toonhoogtegewaarwording 24,341
Retro-steroïden 28, 74
Richtingsisolatoren voor 8-mm- en 4-mm-golven 22, 16
Richtingzoeker, digitale 28,327

Rolmembraan:
afdichting grote drukverschillen met — 26,345
(met rectificatie **27**, 40)
toepassing:
in heetgasmotor 26,350
in industriële koudgaskoelmachine 26,361
in compressoren . . . 26,352 / 30, 51

Röntgen:
richten diamant met —beeldversterker 21,156
onderzoek hete blokken staal met —beeldversterker . . . 21,273
bepaling kristalstructuren met —diffractie 22,135
dosismeters voor diagnostiek en therapie 23, 47
projectietopogrammen dislocaties 23,192
4-MeV-installatie voor materiaalonderzoek 23,309
harmoniseren van röntgenbeelden 24,269
gevoelige stralingsmonitor . . 26, 98
belichtingsautomaat 27, 78
—beelden in kleuren 27,224
automatische spectrometer . . 27,304
anomale transmissie door perfecte kristallen 29,116
monokristal-diffractometer PAILRED . . . . . 29,169 / 29,180
Roosterfouten, invloed in metalen, halfgeleiders en ionenkristallen . 22,406

Ruis:
—generator voor mm-golven 22,404
standaardruisbronnen (microgolven) 23,284

Samarium-kobalt-magneet 29,376
Schokbeproeving van gloeilampen 24,193
Schuifspoel voor regeling h.f.-verhitting 27,110

Schijftriodes voor cm-golven:
10-watt-bredebandversterker voor 7-cm-golven 21, 75
met keramiek (OZ 92) 21,115
experimentele 6000-MHz-triode 21,182
diverse gebruiksmogelijkheden 22, 22
SECAM-systeem voor kleuren-TV. 27,169
Selectieve thermische stralers . . . 25,349
Servomotor, hydraulische, voor freesbank 24,311

Silicium:
bereiding door kroesloos zonesmelten 21,189
bestuurbare —gelijkrichters in omzetters 23,255
inhomogeniteiten in gedoteerde —kristallen 25,107
vonkdotering epitactisch — . 26,193
legeer-diffusiemethode voor — 28,148
anomale diffusie van doteringen in — 28,249
zie ook **Geïntegreerde schakelingen**

Siliciumcarbide:
whiskers van — . . . . . 24,175 / 26,232 / 29,273
mortier van — 26,368
polytypie van — 30, 36
Siliciumijzer, stikstof in — 27, 19
Sinteren onder druk, continu . . . 29, 45
Skineffect . . . . . 28,173 / 28,206 / 28,376
Slagmontage van onderdelen . . . 27, 23
Sleepvoet, spierstimulator voor — 30, 23
Slijpmachientje voor diffusie-onderzoek met radio-isotopen . . . 25,103
Smeren met gassen 29,192
Smoorejecteur 28,145
Sneeuwafscheider voor vloeibare-luchtinstallaties 23, 59
(met rectificatie **23**,420)
Snijsnelheid van stereo-grammofoonplaten 23,149
(met rectificatie **23**,200)
Software, zie **Programmatuur**
Soldeerbaarheid, bepaling van — . 28,372
Soldeerbout met PTC-weerstand als verwarmingselement 30,181
Spanningsonderzoek in glas . . . 22,351
Speelgoed, draadloos bekrachtigd 24, 66
Spiegels, kleurscheidende 24,261
Spierstimulator voor sleepvoetpatiënten 30, 23
Spinelstructuur en magnetisme . . 28, 26
Spiraalgroeflagers, zie **Lagers**

Spiraalwikkelen:
automatisering 21,302
visuele waarneming 22,252

Spoelen:
orthocyclisch wikkelen van — 23,381
met ferrietkern, instabiliteit . 28,284
iso-*Q*-diagrammen van — . . 28,287
supergeleidende — 29,317
Spraak, synthese van — 24,348
Spreekmachine van Von Kempelen 24,354

Staal:
booglassen van — 24, 14
waterstof in ijzer en — . . . 24,220 / 24,251

Statistiek:
toegepaste — (intreerede Hamaker) 22,113
alarmniveau vlambeveiliging 29,266
Stemmen van muziekinstrumenten met digitaal toestel 26,338
Stemvorkmodulator voor CERN-cyclotron 22,170
Step-and-repeat camera voor maken van fotomaskers 30, 57

Stereofonie:
toepassing in zalen 21, 54
in radio-omroep . . . . . 26, 69 / 27, 50

Stereofoto's:
van dislocaties 23,197
met elektronenmicroscoop . . 27,217
Stereo-tekeningen, zie **Tekenen met computer**
Ster-interferometer te Narrabri . 27,197 / 27,208

Stikstof:
bereiding vloeibare — uit lucht 25,348
in siliciumijzer 27, 19
Stirling-proces, zie **Heetgasmotor** en **Koudetechniek**

Stoechiometrie:
existentiegebied 30, 83
puntfouten en beheersing van hun concentraties 30,102
bepalen van existentiegebieden 30,146

Straalzenders:
10-watt-bredebandversterker met 7-cm-schijftriode . . . 21, 75
relaisposten met schijftriodes voor — 22, 22

Stralingsmetingen:
monitor met transistors . . . 21,216
dosismeters voor therapie en diagnostiek 23, 47
gevoelige monitor voor röntgen- en gammastraling . . . 26, 98
halfgeleiderdetectors:
algemeen 27,327
voor α-straling 30, 13
Stralingsoven voor zonesmelten . . 23,143
Stralingsovens, historie van — . . 23,165
„Strip-line" (lintleiding) als basis voor microgolfonderdelen . . . 28,312
Stroombegrenzing bij getransistoriseerde voedingsapparaten . . . 28,153
Structuuronderzoek, zie **Kristallen**

Supergeleiding:
overzicht 29, 1
(met rectificatie **29**,149)
supergeleidende dynamo . . . 25, 16

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

regelbare voeding supergeleidende magneet 27,317
(met rectificatie 28, 47)
skineffect bij — 28,376
supergeleidende magneetspoelen 29,317
Suspensiereactor van KEMA, zie **Kernreactoren**
Symposium Natuurkundig Laboratorium september 1963 . . 25,157-240
Synchrocyclotron, zie **Cyclotron**
Synthese, hydrothermale chemische — 30, 93

„Tedion V 18" 21,242
Tegenkoppeling, bewegings—, bij luidsprekers 29,152

Tekenen met computer:
vervaardiging stereo-tekeningen met COBRA 29,104
stereo-tekeningen van „Duphaston"-molecuul 29,112
stereo-tekening van oplossing Van-der-Pol-vergelijking . . 29,114
van maskers voor geïntegreerde schakelingen 30, 29

Telefonie:
moderne draaggolf— 26,106
companders met hoge graad van compressie 26,116

Telegrafie:
automatische centrales met elektronische geheugens . . 26,143
magnetisch - band - geheugen voor tekens 26,154
historie van — 26,175

Televisie:
beeldbuizen:
restgasonderzoek 23, 92
(met rectificatie 23,168)
experimenteel fluorescentiescherm kleuren-TV . 23,133
(met rectificatie 23,200)
implosievaste — 25,146
fosforen voor kleuren-TV 27, 35
registratie:
magnetische — op geheugenwiel 22, 1
op magneetband (studiokwaliteit) 24, 84
niet-professionele bandopnemer 26,221
kleurentelevisie, zie aldaar
opneembuizen, zie **„Plumbicon" buizen**
vertragingslijnen, diverse toepassingen in — 25,337
lijnenvertaler 25,344
zenders voor banden IV en V. 26,161
elektronenmicroscopie met televisieketen 29,302
projectie op groot formaat . 30,302
reportage-installatie (draagbare zendposten met intersynchronisatie en automatisch gerichte antennes) 30,309
Tellers, zie **Stralingsmetingen**
Ternaire systemen in fazenleer . . 27,228
Theaterakoestiek 21, 54
Thermistors van $BaTiO_3$ . . . 26,285
(met rectificatie 27, 40) 30,174
Thermodynamica, zie **Fazenleer**
Thermografie 30,285
„Thermoplac" draad 23,387
Thermostatische verwarmingselementen, PTC-weerstanden als — 30,174
Thyristors, regeling inductiemotoren met — 28, 1

„Ticonal":
elektronenmicrofoto's 25,201
Mössbauer-spectra 28, 45
TITUS-buis 30,302

„TL" lampen:
omzetters met bestuurbare Sigelijkrichters voor voeding van — 23,255
met verhoogd rendement . . . 25, 86
dimmen van — 27,263
Toonhoogtegewaarwording . . . 24,341
Totale reflexie, maken van vingerafdrukken met — 25, 58
Traagheidsnavigatie 29, 69
Tracers, zie **Radio-isotopen**
Transfertechniek 30,238-30,241

Transistors:
vervaardiging van stabiele — 22,208
gedrag bij opvoering van de frequentie 25, 33
dunnelagen— (veldeffect—) . 27,160
legeer-diffusiemethode voor p.o.b.— 24,229-28,148
Transmissiesysteem voor auto's, elektronisch gestuurd 28,279
Transportreacties, chemische . . 26,283-28,222
Transportverschijnselen in de vaste stof 26,264
Trilplaatcondensator voor elektrometer 25, 77
Trilvullers 24, 88
Triodes voor cm-golven, zie **Schijftriodes**
Tunnelingangen, verlichting . . . 27, 67

Ultrakorte golven:
symmetrische meetleiding . . 21,112
zie verder **Frequentiemodulatie**
Ultrasone radar 28,278
Ultrasone vertragingslijnen, zie **Vertragingslijnen**
Unaire systemen in fazenleer . . 26, 12

Vaatverwijdend middel „Duvadilan" 24, 73
Vaccins, bereiding virus— met weefselcultures 28, 85

Vacuümtechniek:
metalen vacuümapparatuur . 21,177
losmaakbare glasverbindingen 22, 61
getter-ionenpomp 22,272
snelle kryopomp-opstelling . 28,365
Pirani-manometer tot 1000 torr en hoger 30,170
vacuümmeter met diamagnetische levitatie 30,236
zie verder **Omegatron**
Van-der-Pol-vergelijking, stereotekening van oplossing 29,114

Vastestofonderzoek:
overzicht (intreerede Polder) 21,330
bij lage temperaturen . . . 22,193-22,246-22,280
transportverschijnselen in de vaste stof 26,264
Mössbauer-spectra 28, 37
zie verder:
Cadmiumsulfide
Fotogeleiding
Galliumfosfide
Kristallen
Transistors

Vectorcardiografie:
grondslagen 21, 25
universeel toestel 29, 42
Veevoeding, vitamines 28, 89
Veldeffecttransistor 27,160
Vensters met breed spectraal doorlaatgebied, voor vacuümbuizen . 30,300
Verkeerslichtensequenties, berekening 27,302

Verlichting:
parasitaire capaciteiten in neoninstallaties 21,200
(met rectificatie 21,344)
van verkeerswegen, overzicht 23,239
lichtbronnen van GaP 26,303
van tunnelingangen 27, 67
dimmen van „TL" lampen . . 27,263
ontwerpen van weg— 29,307

Verplaatsingsmetingen:
digitale — met fazeraster . . 30,153
digitale — met laser-interferometer 30,164

Verschilversterkers:
algemene beschouwingen . . 22,366
schakelingen voor — 23, 69
(met rectificatie 23,168) 23,119
met rejectiefactor $> 10^6$ . . . 24,279
toepassing in cardiografie . . 21, 25

Versnellers voor elementaire deeltjes:
cyclotron, zie aldaar
lineaire elektronenversneller, 4 MeV, voor röntgenmateriaalonderzoek 23,309
protonensynchrotrons, zie aldaar
Versnellingsbak voor auto, elektronisch gestuurde 28,279
Versterkbuizen voor cm-golven, zie **Schijftriodes**

Versterker:
10-W-bredeband— met 7-cm-schijftriode 21, 75
400-MHz— voor radioastronomie (met EC 157) 21,313
(met rectificatie 22, 79)
zie verder:
Masers
Parametrische versterkers
Verschilversterkers

Vertragingslijnen, ultrasone:
overzicht 25,326
diverse toepassingen in televisie 25,337
voor PAL-kleurentelevisieontvangers 29,251
Verwarmingselementen, PTC-weerstanden als — 30,174
Video-recorder, niet-professionele 26,221
Vingerafdrukken, maken van — met totale reflexie 25, 58
Virusvaccins, bereiding met weefselcultures 28, 85
Visueel zintuigsysteem 24,355
Vitamines in de veevoeding 28, 89

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Vlambeveiliging met UV-detector 29,260 29,266
Vliegvelden, computer voor regeling luchtverkeer 26,128
Vliegwiel voor stabilisatie van ruimtevoertuigen 30, 2
Vloeibareluchtinstallaties, zie **Koudetechniek**
Voedingsapparaten met transistors, stroombegrenzing bij — 28,153
Vonkverspaning, micro— 30,200

Warmtegeleiding van vaste stoffen, meetmethode 22, 12
Warmtewisselaar, compacte, met hoog thermisch rendement . . . 29,162
Waterstof in ijzer en staal . . . 24,220 24,251
Waterstof, kryogene produktie van ultrazuivere — 26, 27
Weergeefbuizen, zie **Televisie, beeldbuizen**
Weerstanden, vervaardiging door opdampen 24,329

Weerstandsnetwerk:
constructie. 21, 11
toepassing voor schrijven van elektronenbanen 23,368
Wegverlichting, zie **Verlichting**

Weiss-gebieden:
zichtbaar maken met Bitterpatronen 24,240
Lorentz-microscopie 29,227
Wervelstroomkoppeling als regelbare aandrijving 27, 41
Whiskers van SiC 24,175 26,232 29,273
Wikkelen, orthocyclisch 23,381

IJzer:
stikstof in silicium— 27, 19
waterstof in — en staal . . 24,220 24,251

Zaalakoestiek 21, 54

Zagen van kristallen, membraanzaag voor — 30,315
Zagerij, toepassing elektronentechniek in hout— 23,169
Zandtransport door stromingen (Deltawerken), onderzoek met radio-isotopen 21,161
Zendbuizen, katode met geringe thermische traagheid voor — . . 26,376

Zenders:
voor televisiebanden IV en V straalzenders, zie aldaar 26,161
Zien bij zeer laag lichtniveau . . 25,254 28,262
Zinksulfide, etsputten 24, 68

Zonesmelten:
van Ge en Si, diverse methodes (o.a. kroesloos) 21,189
van oxiden in koolboogbeeldoven 23,143
Zonnebatterijen, uitgevoerd als monokorrellagen 29,246
„Zoom"-optiek, beeldversterker met elektrostatische — 25,254
Zweeflager, principe 25,296

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Register van artikelen, gerangschikt volgens auteurs
Jaargangen 21-30

Het bij elk artikel vermelde vet gedrukte getal geeft de jaargang aan, het daarop volgende getal de bladzijde. Voor artikelen verschenen in de jaargangen **1-20** raadplege men de vroegere 10-jaren-registers, opgenomen aan het eind van de jaargangen **10, 15, 20** en **25.**

Aa, H. H. M. van der, zie Rietdijk, J. A.

Adams, J. en B. W. Manley
De elektronenmultiplicatorpijp, een nieuwe stralingsdetector **28**,256

Admiraal, D. J. H.
Een geluidsspectroscoop met elektronische aftasting **21**,360

Adriaanse, R. P. en P. van der Laan
Vlambeveiliging met een op UV aansprekende koudekatodebuis, II. Statistische aspecten van het detectieproces en keuze van het alarmniveau **29**,266

Aitchison, C. S.
Parametrische versterkers met laag ruisniveau . . . **28**,304

Albers, W. en C. Haas
Stoechiometrie,
I. Existentiegebied **30**, 83
II. Puntfouten en de beheersing van hun concentraties **30**,102
III. Het bepalen van existentiegebieden **30**,146

Alcock, R. N.
Een digitale richtingzoeker **28**,327

Alink, R. J. H., H. J. Pel en B. W. Speekman
Fabricage en onderzoek van lakdraad **23**,358

Allaries, H.
Radar met 4-mm-golven **25**,241

Almer, F. H. R. en A. Kuiper
Nieuwe ontwikkelingen op het gebied van oxidekatodes, II. Een oxidekatode met halfwattgloeidraad voor katodestraalbuizen **23**, 24

Ammers, H. van en J. Hesselink
Een gevoelige monitor voor röntgen- en gammastraling **26**, 98

Andrich, E.
PTC-weerstanden als thermostatische verwarmingselementen **30**,174
— en K. H. Härdtl
Onderzoekingen aan halfgeleiders van $BaTiO_3$ **26**,285
(zie ook rectificatie, jaarg. **27**, blz. 40)

Andrieux, G. en C. Loty
Directe oscilloscopie van snelle verschijnselen **30**,261
—, zie Gieles, J. P. M.

Arlman, J. J., J. N. Svasek en B. Verkerk
Toepassing van radioactieve isotopen voor het bestuderen van het zandtransport door waterstromingen **21**,161

Bacchi, H. en G. Eschard
Ultrasnelle fotografie **30**,246

Backers, F. Th.
Een magnetisch aslager **22**,238
Een vertragingslijn voor PAL-kleurentelevisieontvangers **29**,251
— en J. H. Wessels
Een experimentele apparatuur voor televisieregistratie op magneetband **24**, 84

Backmark, N., J. E. V. Krim en F. Sellberg
Radar met verspringende frequentie **28**,333

Bähler, W.
Een apparaat voor het automatisch registreren van isocandelakrommen van bundellichten **23**,262
— en W. van der Hoek
Een wervelstroomkoppeling toegepast als regelbare aandrijving **27**, 41

Bakker, W., zie Oort, J. F. van

Balder, J. J.
Gloeilampen met jodiumhoudend vulgas, II. Toepassingsmogelijkheden **23**,222

Banga, U. H. en W. Mesman
Doorvoerovens voor staafmateriaal **27**,342

Barneveld, E. J. van
Digitale bouwstenen **28**, 48

Bartlett, B. E., zie King, R. E. J.

Bastiaans, C. R. en J. van der Steen
Optische meting van de snijsnelheid van stereogrammofoonplaten **23**,149
(zie ook rectificatie, jaarg. **23**, blz. 200)

Bathelt, R. R. en G. A. W. Vermeulen
Een experimenteel fluorescentiescherm in directzichtbuizen voor kleurentelevisie **23**,133
(zie ook rectificatie, jaarg. **23**, blz. 200)

Beckmann, K. H.
Optisch onderzoek aan halfgeleideroppervlakken . . **29**,133

Beek, R. van en A. J. Halbmeyer
Volledig gemechaniseerde montage van onderdelen op panelen met gedrukte bedrading **24**, 45

Beer, A. F., J. B. Coughlin en P. J. Daniel
Enige toepassingen van contourdepositie **28**,253

Beer, A. J. F. de
Een elektrisch afgeschermde ruimte, geschikt voor microgolfmetingen **23**,189
—, H. Groendijk en J. L. Verster
Het schrijven van elektronenbanen met behulp van een weerstandsnetwerk en een analogon-rekenmachine . **23**,368

Beljers, H. G.
Richtingsisolatoren voor millimetergolven **22**, 16

Berben, T. J. en C. W. Berghout
Smeren met gassen **29**,192

Berghout, C. W., zie Berben, T. J.

Berth, M. en J.-J. Brissot
Beeldelektrodes voor opneembuizen ten dienste van infrarood-televisie **30**,277

Beukering, H. C. J. van, zie Rietdijk, J. A.

Beun, M. en L. J. Tummers
Het gedrag van transistors bij opvoering van de frequentie **25**, 33

Beijer, L. B., C. A. J. Jacobs en T. Tol
De jodide-ontladingslamp **29**,361

Blasse, G.
Kristalchemie en magnetisme van oxidische materialen, II. Magnetische verbindingen met spinelstructuur **28**, 26

Boer, B. de
Achter het oor gedragen hoortoestellen **27**,186

Boer, F. de, P. Cirkel, W. F. Nienhuis en C. J. W. Panis
Een implosievaste beeldbuis voor televisie **25**,146

Boer, J. B. de
Verlichting van verkeerswegen **23**,239

Bollée, B.
Een lilliput-elektromotor voor experimenten over de gezichtszin **28**,226
Elektrostatische motoren **30**,183
— en F. Krienen
Het 600-MeV-synchrocyclotron van de CERN te Genève, III. De stemvork-modulator **22**,170
— en G. de Vries
Experimenten op het gebied van parametrische versterking **21**,172

Bommel, A. J. van, zie Braun, P. B.

Bongers, P. F.
Kristalchemie en magnetisme van oxidische materialen, I. Grondslagen en toepassing van de kristalveldtheorie **28**, 16

Boort, H. J. J. van
Een „TL" lamp met verhoogd lichtrendement **25**, 86
— en R. Groth
Lagedruk-natriumlampen met een indiumoxidefilter . **29**, 17

Booth, P. L., zie Smith, F. W.

Borne, J.
Snelle drukkers voor digitale informatie verwerkende apparatuur **29**,213

Bosgra, O. en J. H. G. Roerink
Bereiding van virusvaccins met behulp van weefselcultures **28**, 85

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Botden, Th. P. J.
Een gasontladingsbuis voor indicatie in decimale telschakelingen met transistors **21**,233
Boter, P. A. en M. D. Wijnen
Energiepapier **28**,204
Bouma, H., H. W. Horeman en J. A. J. Roufs
Enige onderzoekingen aan het visuele zintuigsysteem . **24**,355
Boutry, G.-A. en H. Dormont
Enkele eigenschappen van het oppervlak van zuivere alkalimetalen **30**,229
Bouwhuis, G., zie Lang, H. de
Bouwmeester, E., zie Warmoltz, N.
Braun, P. B. en A. J. van Bommel
Bepaling van kristalstructuren met röntgenstralen . . **22**,135
Bregman, F.
Afbeeldingen van driedimensionele energiespectra . . **27**,108
—, zie Tol, M. van
Breimer, H., W. Holm en S. L. Tan
Een kleurentelevisiecamera met „Plumbicon" opneembuizen **28**,346
Brekoo, H. P. J. en A. Verhoeff
Een experimentele hoogspanningsgenerator van zeer kleine afmetingen **23**,354
Bremmer, H.
Het wetenschappelijke werk van Balth. van der Pol . . **22**, 44
Radiogolven verkennen onze atmosfeer **22**, 69
Bril, A. en W. L. Wanmaker
Nieuwe fosforen voor kleurentelevisie **27**, 35
Brissot, J.-J. en A. Lemogne
Het kweken van monokristallen van cuprochloride . **30**,267
—, zie Berth, M.
Brockelsby, C. F. en J. S. Palfreeman
Ultrasone vertragingslijnen en hun toepassing in de televisie **25**,326
Brockman, F. G., H. van der Heide en M. W. Louwerse
Ferroxcube voor protonensynchrotrons **30**,322
Broerse, P. H., A. C. van Dorsten en H. F. Premsela
Elektronenmicroscopie met een televisieketen **29**,302
—, J. H. T. van Roosmalen en S. L. Tan
Een experimentele kleine kleurentelevisiecamera . . . **29**,333
Browne, A.
De ster-interferometer te Narrabri, II. Het meten van de correlatie **27**,208
Bruin, O. A. de, H. F. L. Schöler en J. N. Walop
Retro-steroïden, een nieuwe klasse verbindingen met geslachtshormonale werking **28**, 74
Bruining, H. en S. Duinker
Het researchprogramma van Philips-Zentrallaboratorium GmbH **26**,257
Bruijning, H. G., zie Goorissen, J.
Bueren, H. G. van
Roosterfouten in metalen, halfgeleiders en ionenkristallen **22**,406
Burger, G. C. E. en G. Klein
Vector-elektrocardiografie **21**, 25
Buschow, K. H. J., W. Luiten, P. A. Naastepad en F. F. Westendorp
Magneetmateriaal met een $(BH)_{max}$ van 18,5 miljoen gauss oersted **29**,376
Butterweck, H. J. en F. C. de Ronde
Overmaatse rechthoekige golfpijpen voor millimetergolven **29**, 87
Casimir, H. B. G.
Algemene inleiding tot het Symposium in het Natuurkundig Laboratorium op 26/27 september 1963 . . **25**,158
Enige hoofdlijnen van 50 jaren natuurkundig onderzoek bij Philips **25**,159
In memoriam Prof. dr. G. Holst **29**,301
In memoriam Ir. P. F. S. Otten **30**, 1
Elektriseermachines, deeltjesversnellers en de industrie **30**,319
— en J. Ubbink
Het skineffect,
I. Inleiding; de stroomverdringing in diverse situaties **28**,173
II. Het skineffect bij hoge frequenties **28**,206
III. Het skineffect in supergeleiders **28**,376
Cath, P. G. en J. Ladell
Principe en constructie van de automatische monokristal-diffractometer PAILRED,
I. Het principe van de diffractometer **29**,169
II. De schakelingen voor automatische besturing . . **29**,180
Cayzac, J.
Een installatie voor televisiereportages met draagbare camera's **30**,309
Chippendale, T. R.
Een 4-MeV-röntgeninstallatie voor materiaalonderzoek **23**,309
Cirkel, P. zie Boer, F. de
Cock, H. G. de
Trilvullers **24**, 88
Cohen, A.
Het fonetisch onderzoek **24**,348
Coughlin, J. B. zie Beer, A. F.
Couwenberg, H. J. M. zie Kooy, C.
Crousel, L.
Het opstellen van computerprogramma's **29**,344
Cupido, P. M.
Meten en regelen in de glasfabricage **22**,324
Custers, J. F. H. en A. J. van der Wagt
Het richten van diamanten voor gereedschap met behulp van de röntgenbeeldversterker **21**,156
Dagpunar, S. S., E. G. Meerburg en A. Stecker
Microfonie van elektronenbuizen **22**, 80
Daniel, P. J., zie Beer, A. F.
Dekkers, A. J., A. van Duuren, F. A. Lootsma en J. Vlietstra
Berekening van verkeerslichtensequenties **27**,302
— en A. J. W. Duijvestijn
Het oplossen van een legpuzzel met de PASCAL . . **24**,151
Dekkers, J. R. M., zie Knippenberg, W. F.
Dell, H. A., D. S. Hobbs en M. S. Richards
Een apparaat voor het tellen van microscopische deeltjes en het bepalen van hun grootteverdeling . . **21**,345
Desvignes, F., J. Revuz en R. Zeida
Foto-elektrische vastestof-schakelelementen voor beeldwaarneming in het infrarood **30**,270
Diemer, G.
Opto-elektronica **23**,277
—, zie Santen, J. G. van
Dikhoff, J. A. M.
Inhomogeniteiten in gedoteerde germanium- en siliciumkristallen **25**,107
Doesschate, G. ten
Iets uit de geschiedenis van het meten van reactietijden **24**,383
Domburg, J., zie Schouten, J. F.
Doorn, A. G. van
Het „Plumbicon", vergeleken met andere televisie-opneembuizen **27**, 93
Doorn, C. Z. van
Verhitting van een stof in damp bij onafhankelijk regelbare druk en temperatuur **24**,238
Dormont, H., zie Boutry, G.-A.
Dorsten, A. C. van, zie Broerse, P. H.
Douma, F. en J. Guldemond
Een universele vectorcardiograaf **29**, 42
Drift, A. van der, zie Haan, E. F. de
Dros, A. A.
Een koudgaskoelmachine met hydraulische zuigeraandrijving voor industriële toepassingen **26**,355
Ducot, C.
De Laboratoires d'Electronique et de Physique Appliquée te Limeil-Brévannes bij Parijs. Historie — functie — werkgebieden **30**,217
Duinker, S., zie Bruining, H.
Duis, J. A. ten en E. van der Meulen
Het meten van de soldeerbaarheid van onderdelen . **28**,372
Duuren, A. van, zie Dekkers, A. J.
Duyfjes, W.
Het vernevelen van geconcentreerde dispersies van pesticiden **28**,116
Duijvestijn, A. J. W., zie Dekkers, A. J.
Einramhof, F.
Verlengde visuele waarneming van spiralen op de wikkelmachine **22**,252
— en P. Havas
De automatisering van een spiraalwikkelmachine met behulp van actieve tellers **21**,302
Eisler, P. L., zie Wylie, A. W.
Eland, A. J.
Etsputten op cadmiumsulfidekristallen **22**,278
Etsputten op een zinksulfidekristal **24**, 68

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Elgström, H. en E. Zieler
Een toestel voor automatische belichting in de röntgendiagnostiek **27,** 78
Engelsma, G.
Fenolsynthese en fotomorfogenese **28,**105
Enz, U. en H. Zijlstra
Het bepalen van magnetische grootheden door verplaatsingsmetingen **25,**119
Ermrich, W., zie Klopfer, A.
Es, C. W. van, M. Gevers en F. C. de Ronde
Golfpijpapparatuur voor 2 mm golflengte,
I. Onderdelen **22,**122
II. Meetopstellingen **22,**229
Eschard, G. en R. Polaert
Het vervaardigen van elektronenmultiplicatorpijpen en pijpenplaatjes **30,**257
—, zie Bacchi, H.
Espersen, G. A.
Magnetrons met naleveringskatode **23,**302
Evrard, R.
Absolute micromanometers met diamagnetische levitatie **30,**236
Exalto, L. J. H.
De temperaturen in armaturen voor gloeilampen . . **21,**292
Fast, J. D.
Stikstof in siliciumijzer **27,** 19
— en D. J. van Ooijen
Waterstof in ijzer en staal,
I. Oplossing en afscheiding **24,**220
II. Breukvorming **24,**251
Ferguson, E. T., zie Lang, H. de
Forbes, R. J.
De toepassing van glas in de loop der eeuwen **22,**294
Francken, J. C.
Het weerstandsnetwerk, een eenvoudig en nauwkeurig hulpmiddel voor het bepalen van potentiaalverdelingen **21,** 11
—, zie Waal, J. van der
Garratt, G. R. M.
Uit de begintijd van de telegrafie **26,**175
Gasser, R. en R. Hug
Stroombegrenzingsschakelingen voor getransistoriseerde voedingsapparaten **28,**153
Gast, J. G. C. de, zie Kraakman, H. J. J.
Gentner, W.
Het 600-MeV-synchrocyclotron van de CERN te Genève, I. Doelstelling en ontwerp **22,**150
Gerlach, H. G.
De harpkatode, een katode met geringe thermische traagheid voor kleine zendbuizen **26,**376
Gerthsen, P., J. A. A. Gilsing en M. van Tol
Een automatisch werkend dauwpuntsapparaat met Peltier-koeling **21,**211
Gerwen, P. J. van
Het gebruik van digitale schakelingen bij datatransmissie **30,** 71
—, zie Greefkes, J. A.
Gevers, M., zie Es, C. W. van
Gieles, J. P. M.
Gebruiksmogelijkheden van centimetergolftriodes . . **22,** 22
— en G. Andrieux
Een bredebandversterker met een uitgangsvermogen van 10 W bij 4000 MHz **21,** 75
Gilsing, J. A. A., zie Gerthsen, P.
Ginkel, H. van
Lichtstipaftasters voor kleurentelevisie **21,**251
(zie ook rectificatie, jaarg. **21,** blz. 344)
Glässer, W., H. G. Grimmeiss en H. Scholz
Luminescerende *P-N*-overgangen in galliumfosfide . **25,** 56
Goedkoop, J. A.
Neutronendiffractie **23,** 33
(zie ook rectificatie, jaarg. **23,** blz. 168)
Gomes de Mesquita, A. H.
PAILRED, een automatische monokristal-diffractometer **27,** 48
De polytypie van siliciumcarbide **30,** 36
Goorissen, J.
Segregatie en dotering van verontreinigingen bij de bereiding van germanium en silicium **21,**189
— en H. G. Bruijning
Doteermethodes bij epitactische groei van silicium- en germaniumlagen **26,**193
Gossel, D.
Het digitaal voortbrengen van muzikale toonintervallen **26,**338
—, G. Kaps en W. Schott
Een nieuw systeem van digitale bouwstenen voor industriële meet- en regelapparatuur **26,**331
Gouiran, R.
Vijf protonensynchrotrons **30,**341
Graaff, H. C. de en H. Koelmans
De dunnelagentransistor **27,**160
Gradstein, S.
De rekenmachine van Blaise Pascal **24,**102
Greefkes, J. A., P. J. van Gerwen en F. de Jager
Companders met hoge graad van compressie der niveauvariaties op telefonieverbindingen **26,**116
Grimmeiss, H. G., W. Kischio en H. Scholz
Lichtbronnen en fotocellen van galliumfosfide **26,**303
— en H. Koelmans
P-N-luminescentie in galliumfosfide **22,**384
—, zie Glässer, W.
Groendijk, H., zie Beer, A. J. F. de
Groenhuis, H. en W. L. L. Lenders
Slagmontage van onderdelen op panelen met gedrukte bedrading **27,** 23
Groth, R. en E. Kauer
Warmte-isolatie van natriumlampen **26,**270
—, zie Boort, H. J. J. van
Grijseels, R. A.
Een elektronische rekenmachine als hulpmiddel bij de regeling van het luchtverkeer **26,**128
Guldemond, J., zie Douma, F.
Haan, E. F. de
Het „Plumbicon", een nieuwe televisie-opneembuis . **24,** 64
—, A. van der Drift en P. P. M. Schampers
Het „Plumbicon", een nieuwe televisie-opneembuis . **25,**277
—, F. M. Klaassen en P. P. M. Schampers
Een experimentele „Plumbicon" opneembuis met verhoogde gevoeligheid voor rood licht **26,** 55
Haanstra, H. B.
Stereofotografie met de elektronenmicroscoop **27,**217
— en W. F. Knippenberg
Kristalgroei van siliciumcarbide (II) **26,**232
— en S. C. Rademaker
Het matteren van glas **29,**146
— en H. Zijlstra
Elektronenmicroscopisch onderzoek van de domeinstructuur van magnetische deeltjes **29,**227
—, zie Knippenberg, W. F.
—, zie Nieuwenhuizen, J. M.
Haarhuis, G. J.
De Philips heliumliquefactor **29,**205
Haas, C., zie Albers, W.
Haas, G.
Problemen en ontwikkelingstendensen van de randapparatuur bij informatieverwerking **26,**314
Haaijman, P. W.
Integratie van elektronische schakelingen **27,**139
Hagedoorn, H. L., zie Verster, N. F.
Haisma, J., S. J. van Hoppe, H. de Lang en J. van der Wal
Een kleine, stabiele gaslaser **24,**217
Haitjema, M. Tj., W. Kopinga en S. J. Porte
Metingen aan luidsprekers **21,**368
Halberstadt, J.
Proeven met radioactieve preparaten van het acaricide „Tedion V 18" **21,**242
Halbertsma, N. A.
Het ontstaan van een gloeilampenfabriek in 1891 . . **23,**202
Halbmeyer, A. J., zie Beek, R. van
Hamaker, H. C.
Toegepaste statistiek, een belangrijke faze in de ontwikkeling van de experimentele wetenschap **22,**113
Hammar, M., A. Rydahl en B. Westerlund
Elektronentechniek in de houtindustrie **23,**169
Hanbury Brown, R.
De ster-interferometer te Narrabri, I. Principe van de intensiteitsinterferometer; algemene beschrijving . . **27,**197
Hansen, H. N.
Moderne systemen voor draaggolftelefonie **26,**106
Hardeman, G. E. G.
Dubbele magnetische resonantie **24,**201
Härdtl, K. H., zie Andrich, E.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Haringx, J. A.
Een contourfreesbank met numerieke besturing, I. Algemene beschrijving **24**,289
Harkema, P.
Automatische telegraafcentrales met elektronische geheugens **26**,143
Harrick, N. J.
Het maken van vingerafdrukken met behulp van totale reflexie **25**, 58
Harrison, F. W., R. F. Pearson en K. Tweedale
Onderzoek aan monokristallen van ferrieten en granaten **28**,235
Hart, P. A. H.
Standaardruisbronnen **23**,284
— en G. H. Plantinga
Een experimentele ruisgenerator voor millimetergolven **22**,404
Harten, G. A. en A. K. Koroncai
Continue meting van de hartfrequentie van werkende personen **21**,297
Harten, H. U., R. Memming en G. Schwandt
Onderzoekingen aan het grensvlak van germanium en water **26**,294
Havas, P., zie Einramhof, F.
Hector, F.
Een apparatuur voor traagheidsnavigatie **29**, 69
Heide, H. van der, zie Brockman, F. G.
Helden, G. W. M. T. van, zie Velde, T. S. te
Hentley, E. L., zie Smith, F. W.
Hesselink, J. en K. Reinsma
Dosismeters voor röntgenstraling **23**, 47
—, zie Ammers, H. van
Heuven, E. W. van
Schokbeproeving van gloeilampen **24**,193
Heijne, L.
Fysische grondslagen van de fotogeleiding,
I. Grondbegrippen; contacten op halfgeleiders . . **25**,262
II. Kinetica van het recombinatieproces; gevoeligheid en responsiesnelheid **26**,235
III. Inhomogeniteitseffecten **29**,230
— en A. T. Vink
Een Pirani-manometer voor drukken tot 1000 torr en hoger **30**,170
Hily, C.
Lenzenstelsels voor afbeelding in het infrarood . . . **30**,298
Hobbs, D. S., zie Dell, H. A.
Hoek, W. van der, zie Bähler, W.
Hoekstra, P. en Ch. Meyer
Cinemaprojectie met flitsende lichtbron **21**,121
Hof, A. P. M. van 't, zie Oosterkamp, W. J.
Hofker, W. K.
Halfgeleiderdetectors voor ioniserende straling . . . **27**,327
—, K. Nienhuis en J. C. Post
Spectrometrie van α-straling met halfgeleiderdetectors **30**, 13
Holm, W., zie Breimer, H.
Holst, G.
In memoriam Dr. E. Oosterhuis **27**,121
Hoppe, S. J. van, zie Haisma, J.
Horeman, H. W., zie Bouma, H.
Hug, R., zie Gasser, R.
Hurck, N. van, F. L. H. M. Stumpers en M. Weeda
Stereofonische radio-omroep,
I. Systemen en schakelingen **26**, 69
II. Gevoeligheid voor storingen. **27**, 50
—, zie Seeger, Ch. L.
Huijer, P., W. Th. Langendam en J. A. Lely
Vervaardiging van weerstanden door opdampen . . **24**,329
Iperen, B. B. van
Reflexieklystrons voor 4 en 2,5 mm golflengte . . . **21**,225
— en W. Kuypers
Een klystronvermenigvuldiger voor het opwekken van 0,8-mm-golven **26**,370
— en J. L. van Lidth de Jeude
Een multireflexieklystron voor toepassing in microgolfbakens **24**,178
Jacobs, C. A. J., zie Beijer, L. B.
Jager, F. de
Modulatie, gisteren en morgen **25**,171
—, zie Greefkes, J. A.
Jansen Gration, M. J.
De planning van het nieuwe gebouwencomplex voor Philips' Natuurkundig Laboratorium **25**,206
Jatteau, M.
Een apparatuur voor infrarood-thermografie voor medische toepassingen **30**,285
Jenkinson, A. E.
Projectietopogrammen van dislocaties **23**,192
Jochems, P. J. W.
De legeer-diffusietechniek bij de vervaardiging van hoogfrequentietransistors **24**,229
— en E. Kooi
Metallurgische aspecten van de legeer-diffusiemethode uit de transistortechnologie **28**,148
Jonas, B. en G. Seitz
Losmaakbare verbindingen voor glazen hoogvacuümapparatuur **22**, 61
Kampen, H. van
Magnetisch-band-geheugen voor telegraaftekens . . . **26**,154
Kaps, G., zie Gossel, D.
Kauer, E.
Lichtopwekking met selectieve thermische stralers . **25**,349
—, zie Groth, R.
Kessel, Th. J. van
„Compatible" eenzijbandmodulatie **25**,317
King, H. N. G.
Chemische depositie met een elektronenbundel . . . **28**,272
King, R. E. J. en B. E. Bartlett
Eigenschappen en toepassingen van indiumantimonide. **22**,357
Kischio, W., zie Grimmeiss, H. G.
Klaassen, F. M., zie Haan, E. F. de
Klaassen, J. A. en S. H. de Koning
Bewegingstegenkoppeling bij luidsprekers **29**,152
Klein, G. en J. J. Zaalberg van Zelst
Algemene beschouwingen over verschilversterkers . . **22**,366
Schakelingen voor verschilversterkers, I, II . . . { **23**, 69 / **23**,119
(zie ook rectificatie, jaarg. **23**, blz. 168)
Verschilversterkers met een rejectiefactor groter dan een miljoen **24**,279
Een niet-lineair belastbare laagfrequentie-oscillator met zeer kleine vervorming **25**, 20
Combinaties van buizen en transistors in een gestabiliseerde gelijkspanningsbron van 2000 V **25**, 93
(zie ook rectificatie, jaarg. **25**, blz. 276)
Enkele eenvoudige actieve filters voor lage frequenties **25**,376
—, zie Burger, G. C. E.
Kleis, D.
Moderne geluidstechniek, II. Elektro-akoestische voorzieningen in grote theaters **21**, 54
Klopfer, A. en W. Ermrich
Een kleine getter-ionenpomp **22**,272
— en W. Schmidt
Een omegatron voor kwantitatieve analyse van gassen **22**,199
Klostermann, F. T.
Een repeteercamera voor het maken van fotomaskers voor geïntegreerde schakelingen **30**, 57
Knippenberg, W. F., H. B. Haanstra en J. R. M. Dekkers
Kristalgroei van siliciumcarbide (I) **24**,175
—, B. Lersmacher, H. Lydtin en A. W. Moore
Pyrolytisch grafiet **28**,133
— en G. Verspui
Kristalgroei van siliciumcarbide (III) **29**,273
—, G. Verspui en J. Visser
Een mortier van siliciumcarbide **26**,368
—, zie Haanstra, H. B.
Knowles, J. E.
Het omkeerproces van de magnetisatie in ferrieten met een rechthoekige hysteresislus **24**,240
Knudsen, B., zie Vermeulen, J.
Koedam, M.
Bepaling van kleine afmetingen door buiging van laserlicht **27**,183
Koelmans, H., zie Graaff, H. C. de
—, zie Grimmeiss, H. G.
Koning, S. H. de, zie Klaassen, J. A.
Kooi, E., zie Jochems, P. J. W.
Kooi, H. van der
Bewaking van de regelstaafbesturing van de kernreactor te Dodewaard **30**, 48
Kooy, C. en H. J. M. Couwenberg
Zonesmelten van oxides in een koolboogbeeldoven . **23**,143

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Kopinga, W., zie Haitjema, M. Tj.
Koroncai, A. K., zie Harten, G. A.
Kortleven, S., zie Schmitter, K. H.
Koster, J.
Verschijnselen bij FM-ontvangst langs verschillende wegen tegelijk, en het nabootsen ervan in het laboratorium **22**,374
Koten-Hertogs, M. van, zie Wessels, J. S. C.
Kotte, J. J.
Een cinemaprojector van vereenvoudigde constructie . **21**,131
Kraakman, H. J. J. en J. G. C. de Gast
Een precisiedraaibank met hydrostatische lagering en aandrijving **30**,121
Krienen, F., zie Bollée, B.
Krim, J. E. V., zie Backmark, N.
Kroon, D. J.
Kernspinresonantie **21**,278
Kruiff, G. T. de en N. F. Verster
Het 160-MeV-synchrocyclotron met bundelextractie te Orsay **23**,397
Kruishoop, J. C. W.
Non-polaire elektrolytcondensatoren **29**, 37
Kuiper, A., zie Almer, F. H. R.
Kuypers, W., zie Iperen, B. B. van
Laan, C. J. M. van der en K. Roozendaal
Een sneeuwafscheider voor vloeibareluchtinstallaties . **23**, 59
(zie ook rectificatie, jaarg. **23**, blz. 420)
Laan, P. van der, zie Adriaanse, R. P.
Laar, J. van en J. J. Scheer
Foto-emissie van halfgeleiders **29**, 54
Ladell, J., zie Cath, P. G.
Lang, H. de en G. Bouwhuis
De kleurscheiding in kleurentelevisiecamera's **24**,261
—, E. T. Ferguson en G. C. M. Schoenaker
Nauwkeurige digitale verplaatsingsmetingen met optische middelen, I. Verplaatsingsmeting met een reflecterend fazeraster **30**,153
— en G. Bouwhuis
Nauwkeurige digitale verplaatsingsmetingen met optische middelen, II. Interferometrische verplaatsingsmeting met een laser **30**,164
—, zie Haisma, J.
Lange, H. K. A. de
Een televisie-bandopnemer voor niet-professioneel gebruik **26**,221
Langendam, W. Th., zie Huijer, P.
—, zie Reynst, M. F.
Leblans, L. M. L. J. en M. L. Verheijke
Een precisieslijpmachientje voor diffusie-onderzoek met radioactieve isotopen **25**,103
Lechner, W.
Peltier-koeling **27**, 1
Leenhouts, J. I.
Stereo-tekeningen, gemaakt met behulp van een digitale rekenmachine, II. Stereo-afbeelding van het „Duphaston"-molecuul **29**,112
Leeuwen, H. J. van en J. Vredenbregt
Een spierstimulator voor sleepvoet-patiënten **30**, 23
Legoux, R.
De transfertechniek, een nieuwe methode voor de formering van fotokatodes **30**,238
Vensters met een breed spectraal doorlaatgebied . . **30**,300
Lely, J. A., zie Huijer, P.
Lemmens, H. J. en P. Zalm
Nieuwe ontwikkelingen op het gebied van oxidekatodes, I. Oxidekatodes voor belastingen van 1 tot 2 A/cm² **23**, 21
Lemogne, A., zie Brissot, J.-J.
Lenders, W. L. L.
Het orthocyclisch wikkelen van spoelen **23**,381
—, zie Groenhuis, H.
Lersmacher, B., zie Knippenberg, W. F.
Lewin, I. H.
Het boren van diamanten met een elektronenbundel . **28**,275
Leyten, J., zie Tjaden, D. L. A.
Lidth de Jeude, J. L. van, zie Iperen, B. B. van
Lindop, R. W.
Een elektronisch gestuurd transmissiesysteem voor automobielen **28**,279
Lokker, J. C.
Het 50-jarig jubileum van de halfwattlamp **25**, 2
Loos, C. H.
De invloed van niet-lineair gedrag van een registreertoestel op de eigenschappen van een regelkring . . . **23**,159
Lootsma, F. A., zie Dekkers, A. J.
Lopes Cardozo, B., zie Ritsma, R. J.
Lopitzsch, K. H.
De schuifspoel, een regelorgaan bij hoogfrequentverhitting **27**,110
Loty, C., zie Andrieux, G.
Louwerse, M. W., zie Brockman, F. G.
Luiten, A. L.
Supergeleidende magneten **29**,317
(zie ook aanvulling, jaarg. **30**, blz. 169)
Luiten, W., zie Buschow, K. H. J.
Lydtin, H., zie Knippenberg, W. F.
Man, Th. J. de
Vitamines in de veevoeding **28**, 89
Manley, B. W., zie Adams, J.
Marie, G.
Televisieprojectie op groot formaat met een optische versterkbuis gebaseerd op het Pockels-effect **30**,302
Meerburg, E. G., zie Dagpunar, S. S.
Meerendonk, H. W. van den en J. H. Schouten
De snijverliezen bij de fabricage van golfkarton . . . **24**,121
Memming, R., zie Harten, H. U.
Mentzel, E. en H. Stietzel
Een schijftriode in metaal-keramiekuitvoering voor frequenties tot 6000 MHz **21**,115
Mesman, W., zie Banga, U. H.
Meulen, E. van der, zie Duis, J. A. ten
Meyer, Chr.
Recente ontwikkelingen op het gebied van de ontladingsflitslampen **22**,389
—, zie Hoekstra, P.
Meyer, D.
Een methode voor het omzetten van te meten grootheden in frequenties **29**,194
Meijer, R. J., zie Rietdijk, J. A.
Meijering, J. L.
Fazenleer,
I. Inleidende beschouwingen over unaire en binaire systemen **26**, 12
II. Kwantitatieve beschouwingen over binaire systemen **26**, 58
III. Ternaire systemen **27**,228
Moed, H. D.
„Duvadilan", een nieuw vaatverwijdend middel . . . **24**, 73
Moerkens, J. C.
Het dimmen van „TL" lampen **27**,263
Moore, A. W., zie Knippenberg, W. F.
Munk, E. C. en A. Rademakers
Geïntegreerde schakelingen met opgedampte dunne lagen **27**,141
Muijderman, E. A.
Nieuwe lagervormen: gaslager en spiraalgroeflager . **25**,296
(zie ook rectificatie, jaarg. **25**, blz. 347)
Naastepad, P. A., zie Buschow, K. H. J.
Newcomb, C. V. en E. C. Snelling
Onderzoek van de instabiliteit van spoelen met ferrietkern **28**,284
Nicholas, K. H.
Onderzoek van de anomale diffusie van doteringen in silicium **28**,249
Nie, A. G. van en J. J. Zaalberg van Zelst
Een trilplaatcondensator, gedreven door een hoogfrequent elektrisch veld **25**, 77
Nienhuis, K., zie Hofker, W. K.
—, zie Reifenschweiler, O.
Nienhuis, W. F., zie Boer, F. de
Niessen, C. en H. E. J. Wulms
Automatisch tekenen van maskers voor geïntegreerde schakelingen **30**, 29
Nieuwenhuizen, J. M. en H. B. Haanstra
Microfractografie van dunne lagen **27**,115
Noordermeer, L. J., zie Oosterhout, G. W. van
Nussli, J.
Fotomultiplicators en de transfertechniek **30**,241
—, zie Piétri, G.
Nijenhuis, W.
De PASCAL, een zeer snelle digitale elektronische rekenmachine voor Philips' Rekencentrum **23**, 1

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Rekengeluiden van de PASCAL **24**,157
— en H. van de Weg
Ontwikkelingen op het gebied van elektronische rekenmachines in het laatste decennium **26**, 83
Okkerse, B.
Het maken van dislocatievrije germaniumkristallen . **21**,336
— en P. Penning
Anomale transmissie van röntgenstraling door perfecte kristallen **29**,116
Okumura, T.
De MOS-tetrode **30**,138
Ommering, R. Ch. van en G. C. M. Schoenaker
Een contourfreesbank met numerieke besturing, II. Het commando-orgaan **24**,298
De COBRA, een kleine digitale rekenmachine voor numerieke besturing van gereedschapswerktuigen . . **27**,285
Oort, J. F. van en W. Bakker
Draadloos bekrachtigd speelgoed **24**, 66
Oosterhout, G. W. van
Dichtheidsmeting aan kleine deeltjes **28**, 14
— en L. J. Noordermeer
Snelle en nauwkeurige magnetische metingen aan enkele milligrammen materiaal **25**,139
Oosterkamp, W. J.
Technische vruchten van kernfysisch onderzoek . . **24**, 1
—, A. P. M. van 't Hof en W. J. L. Scheren
Röntgenbeelden in kleuren **27**,224
—, J. Proper en M. C. Teves
Röntgenonderzoek van hete blokken staal in een walserij **21**,273
Ooijen, D. J. van, zie Fast, J. D.
Orton, J. W., D. H. Paxman en J. C. Walling
Fysisch onderzoek aan masermaterialen **28**,246
Osenbruggen, C. van
Microvonkverspaning **30**,200
Oudemans, G. J.
Continu sinteren onder druk **29**, 45
Overbeek, A. J. W. M. van en W. A. J. M. Zwijsen
Afstembare geïntegreerde schakelingen **27**,283
Palfreeman, J. S.
Een opto-akoestische correlator voor radardetectie . **28**,318
—, zie Brockelsby, C. F.
Panis, C. J. W., zie Boer, F. de
Pannenborg, A. E.
Ontstaansgeschiedenis van de Philips researchlaboratoria in Duitsland **26**,253
Pasma, D. en G. Spakman
Een transistor-autoradio met druktoetsafstemming . **24**, 29
Paxman, D. H., zie Orton, J. W.
Peacock, R. V.
Kritische parameters van opgedampte NiFe-lagen voor snelle geheugens **28**,288
Pearson, R. F., zie Harrison, F. W.
Pel, H. J., zie Alink, R. J. H.
Penning, P., zie Okkerse, B.
Piétri, G. en J. Nussli
Ontwerp en eigenschappen van moderne fotomultiplicatorbuizen **29**,276
(zie ook rectificatie, jaarg. **29**, blz. 305)
Plantinga, G. H.
Een impulsmagnetron voor 2,5 mm golflengte . . . **25**,129
—, J. W. Rommerts en Th. J. Westerhof
Een 8-mm-reflexieklystron van eenvoudige constructie **27**,299
— en Th. J. Westerhof
Een experimenteel reflexieklystron voor 1,5 mm golflengte **28**,186
—, zie Hart, P. A. H.
—, zie Verweel, J.
Ploos van Amstel, J. J. A.
Enkele methodes ter verkrijging van stabiele transistors **22**,208
Een techniek voor het opdampen van dunne en dikke lagen **28**, 61
Polaert, R., zie Eschard, G.
Polder, D.
De vruchten en de wortels van het onderzoek van de vaste stof **21**,330
Poorter, T.
Vlambeveiliging met een op UV aansprekende koudekatodebuis, I. Constructie en schakeling van de buis . **29**,260
Porte, S. J., zie Haitjema, M. Tj.
Post, J. C., zie Hofker, W. K.
Prast, G.
Een koudgaskoelmachine voor temperaturen tot 20 °K en lager **26**, 1
Premsela, H. F., zie Broerse, P. H.
Proper, J., zie Oosterkamp, W. J.
Rabenau, A.
Chemische transportreacties **26**,283
— en H. Rau
Kristalgroei en chemische synthese onder hydrothermale condities **30**, 93
Rademaker, S. C., zie Haanstra, H. B.
Rademakers, A., zie Munk, E. C.
Radziwill, W.
Een zeer efficiënte kleine gelijkstroommotor met elektronische commutatie **30**, 7
Rakels, C. J., J. C. Tiemeijer en K. W. Witteveen
De Philips elektronenmicroscoop EM 300 . . . . . **29**,380
Rau, H., zie Rabenau, A.
Reifenschweiler, O. en K. Nienhuis
De neutronenbuis, een eenvoudige en compacte neutronenbron **23**,341
Reinhoudt, J. P.
Een vliegwiel voor stabilisatie van ruimtevoertuigen . **30**, 2
Reinsma, K., zie Hesselink, J.
Remmers, G.
Met vet gesmeerd spiraalgroeflager voor doorgaande as **27**,130
Renelt, G. en J. Schröder
Beveiliging van informatie bij invoer en transmissie met behulp van één of twee controletekens **26**,323
Revuz, J., zie Desvignes, F.
Reynst, M. F. en W. Th. Langendam
Berekening van luidsprekermagneten van ferroxdure . **24**,144
Richards, M. S., zie Dell, H. A.
Rietdijk, J. A.
De smoorejecteur, een nieuw element voor het bereiken van zeer lage temperaturen **28**,145
—, H. C. J. van Beukering, H. H. M. van der Aa en R. J. Meijer
Een hermetische stang- en zuigerafdichting voor grote drukverschillen **26**,345
(zie ook rectificatie, jaarg. **27**, blz. 40)
Ritsma, R. J. en B. Lopes Cardozo
De toonhoogtegewaarwording **24**,341
Robinson, S. J. en P. T. Saaler
Een reeks microgolfonderdelen op basis van coaxiale leiding en lintleiding **28**,312
Roerink, J. H. G., zie Bosgra, O.
Rommerts, J. W., zie Plantinga, G. H.
Ronde, F. C. de, zie Butterweck, H. J.
—, zie Es, C. W. van
Roosmalen, J. H. T. van
Experimentele elektrostatisch gefocusseerde „Plumbicon" buizen **28**, 64
—, zie Broerse, P. H.
Roozendaal, K., zie Laan, C. J. M. van der
Roufs, J. A. J., zie Bouma, H.
Rydahl, A., zie Hammar, M.
Saaler, P. T., zie Robinson, S. J.
Santen, J. G. van en G. Diemer
Een fotogelijkrichtende laag voor een leesmatrix . . . **23**,329
Saraga, P., J. A. Weaver en D. J. Woollons
Automatisch lezen van geschreven of gedrukte tekens . **28**,297
Schagen, P. en A. W. Woodhead
Onderzoek aan beeldtransformators en beeldversterkers **28**,262
—, zie Woodhead, A. W.
Schalkwijk, W. F.
Operations Research **25**, 65
Schampers, P. P. M., zie Haan, E. F. de
Schee, B. L. A. van der en M. van Tol
De instrumentatie voor een subkritische homogene suspensiereactor, II. Meting en regeling van werkparameters **21**, 98
Scheer, J. J., zie Laar, J. van
Scheren, W. J. L., zie Oosterkamp, W. J.
Schiefer, G.
Een symmetrische meetleiding voor meter- en decimetergolven **21**,112
Een kleine ferroxcube-antenne voor ultrakortegolfontvangst **24**,324

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Schmidt, W.
Verwarming van spijzen in een magnetronfornuis . . **22,** 99
Schmidt, W., zie Klopfer, A.
Schmidt-Tiedemann, K. J.
Transportverschijnselen in de vaste stof **26,**264
Schmitter, K. H. en S. Kortleven
Het 600-MeV-synchrotron van de CERN te Genève, II. De hoogfrequentie-installatie **22,**157
Schmitz, A.
Kristalschakelingen **27,**152
Schoenaker, G. C. M.
Stereo-tekeningen, gemaakt met behulp van een digitale rekenmachine, I. Het maken van stereo-tekeningen met de COBRA-tekentafelcombinatie . . **29,**104
—, zie Lang, H. de
—, zie Ommering, R. Ch. van
Schoenmakers, W. J.
Een gevoelige koppelmeter voor hoge frequenties . . . **27,**350
Schöler, H. F. L., zie Bruin, O. A. de
Scholz, H.
Kristalgroei met alternerende temperatuurgradiënt . **28,**222
—, zie Glässer, W.
—, zie Grimmeiss, H. G.
Schott, W., zie Gossel, D.
Schouten, J. F.
Het Instituut voor Perceptie Onderzoek **24,**337
— en J. Domburg
De DONDERS, een elektronisch meetsysteem voor menselijke reacties **24,**372
Schouten, J. H., zie Meerendonk, H. W. van den
Schreuder, D. A.
Het verlichten van tunnelingangen, fysiologisch-optisch beschouwd **27,** 67
Schröder, J.
Een eenvoudige methode voor het bepalen van het warmtegeleidingsvermogen van vaste stoffen . . . **22,** 12
Voorbeelden uit de fluorchemie en mogelijke technische toepassingen **26,**277
Schröder, J., zie Renelt, G.
Schulten, G.
Leidingen voor oppervlakgolven bij zeer hoge frequenties, II. Toepassingen van de diëlektrische leiding **26,**211
Schwandt, G., zie Harten, H. U.
Schijff, F. J.
De instrumentatie voor een subkritische homogene suspensiereactor, IV. De beveiligingsschakeling . . . **21,**151
Seeger, Ch. L., F. L. H. M. Stumpers en N. van Hurck
Een 75-cm-ontvanger voor radioastronomie en enige hiermee verkregen resultaten **21,**313
(zie ook rectificatie, jaarg. **22,** blz. 79)
Seitz, G., zie Jonas, B.
Sellberg, F., zie Backmark, N.
Seppen, J. M. G. en J. Verstraten
Een 8-mm-radarinstallatie **21,** 41
Severin, H.
Leidingen voor oppervlakgolven bij zeer hoge frequenties, I. De verschillende vormen van leidingen . **26,**202
Shaievitz, S.
Kryogene produktie van ultrazuivere waterstof . . . **26,** 27
Slob, A.
Snelle logicaschakelingen met gering energieverbruik **29,**371
Slofstra, C.
Het toepassen van digitale bouwstenen in industriële apparatuur **29,** 19
Slooten, J. van
FM-ontvangst met relatief sterke storingen **22,**219
Sluyterman, L. A. Æ.
De relatie tussen enzym, substraat en produkt **27,** 57
Smith, F. W., P. L. Booth en E. L. Hentley
Masers voor een radioastronomische interferometer . **27,**317
(zie ook rectificatie, jaarg. **28,** blz. 47)
—, zie Walling, J. C.
Snelling, E. C.
Iso-*Q*-diagrammen **28,**287
—, zie Newcomb, C. V.
Spakman, G., zie Pasma, D.
Speekman, B. W., zie Alink, R. J. H.
Stecker, A., zie Dagpunar, S. S.
Steen, J. van der, zie Bastiaans, C. R.
Stevels, J. M.
Nieuwe inzichten in de structuur van glas **22,**312
Stietzel, H., zie Mentzel, E.
Stratum, A. J. A. van, zie Zalm, P.
Stumpers, F. L. H. M., zie Hurck, N. van
—, zie Seeger, Ch. L.
Suchtelen, H. van
Een eenvoudige schakeling voor een lichtbron van constante sterkte **21,**246
Svasek, J. N., zie Arlman, J. J.
Tan, S. L., zie Breimer, H.
—, zie Broerse, P. H.
Taylor, D. G., zie Woodhead, A. W.
Teer, K.
De hoorbaarheid van fazefouten **25,** 74
Teves, M. C., zie Oosterkamp, W. J.
Thees, R.
Kleine elektromotoren **26,**309
Tiemeijer, J. C., zie Rakels, C. J.
Tjaden, D. L. A. en J. Leyten
Een model op schaal 5000:1 van het magnetische registratieproces **25,**365
T'jampens, G. R. en M. H. A. van de Weijer
Gloeilampen met broom- en met chloorhoudend vulgas **27,**132
Tol, M. van
De instrumentatie voor een subkritische homogene suspensiereactor, IIIB. Het meten van grote neutronenflux met behulp van een elektrometer **21,**147
Toepassing van regeltheorie op regelkringen met lineaire elementen **23,** 79
Kringversterking en stabiliteit van eenvoudige regelsystemen **23,**114
— en F. Bregman
Een stralingsmonitor met transistors **21,**216
—, zie Gerthsen, P.
—, zie Schee, B. L. A. van der
Tol, T., zie Beijer, L. B.
Trier, P. E.
Geschiedenis en functie van het Mullard research-laboratorium **28,**229
Tummers, L. J., zie Beun, M.
Tweedale, K., zie Harrison, F. W.
Tijen, J. W. van
Gloeilampen met jodiumhoudend vulgas, I. Principe . **23,**217
Ubbink, J., zie Casimir, H. B. G.
Valster, F.
Een radarantenne met snel draaiende bundel **22,** 37
Veen, R. van der
Het biologisch evenwicht **23,**105
Het bestrijden van ziekten en plagen in de landbouw in het verleden **28,**125
Velde, T. S. te en G. W. M. T. van Helden
Monokorrellagen **29,**246
Venema, A.
Een snelle kryopomp-opstelling voor ultrahoog vacuüm **28,**365
Verbeek, H. J.
Een tweetrapscompressor met rolmembranen **30,** 51
Verheijke, M. L., zie Leblans, L. M. L. J.
Verhoeff, A., zie Brekoo, H. P. J.
Verkerk, B., zie Arlman, J. J.
Verloop, A.
Beschikbaarheid van organische verbindingen in hogere planten **28,** 97
Vermeulen, G. A. W., zie Bathelt, R. R.
Vermeulen, J. en B. Knudsen
Het ontwerpen van een wegverlichting van voorgeschreven luminantie en gelijkmatigheid **29,**307
Verspui, G., zie Knippenberg, W. F.
Verster, J. L.
Een apparaat voor het automatisch schrijven van elektronenbanen **22,**257
—, zie Beer, A. J. F. de
Verster, N. F.
Ontsluiten van het ontoegankelijke **27,** 29
— en H. L. Hagedoorn
Onderzoek van het magneetveld van een isochroon cyclotron **24,**106
(zie ook rectificatie, jaarg. **24,** blz. 260)
—, zie Kruiff, G. T. de
Verstraten, J., zie Seppen, J. M. G.
Verweel, J. en G. H. Plantinga
Een serie impulsmagnetrons met L-katode voor centimeter- en millimetergolven **21,** 1

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Viersma, T. J.
Enige beschouwingen over numerieke besturing van gereedschapswerktuigen **24**,165
Een contourfreesbank met numerieke besturing, III. De hydraulische servomotor **24**,311
Vink, A. T., zie Heijne, L.
Vink, H. J.
Bijdragen van het Philips' Natuurkundig Laboratorium tot de chemie van de vaste stof **25**,183
Visscher, J. M.
Een snelle ponsbandlezer **28**,161
Visser, J., zie Knippenberg, W. F.
Vlaardingerbroek, M. T.
Een experimentele triode voor 6000 MHz **21**,182
— en K. R. U. Weimer
Bundel-plasmaversterkbuizen **22**,273
Vlietstra, J.
De APT-programmeertaal voor numerieke besturing van gereedschapswerktuigen **28**,339
—, zie Dekkers, A. J.
Volger, J.
Fysisch onderzoek bij lage temperatuur,
I. Inleiding **22**,193
II. Elektronengeleiding in metalen en halfgeleiders . **22**,246
III. Warmtegeleiding in isolatoren; paramagnetisme; diëlektrische verliezen samenhangend met chemische roosterfouten **22**,280
Een dynamo voor het opwekken van een persisterende stroom in een supergeleidende keten **25**, 16
Supergeleiding **29**, 1
(zie ook rectificatie, jaarg. **29**, blz. 149)
Vonk, G.
Een compacte warmtewisselaar met hoog thermisch rendement **29**,162
Vorm Lucardie, J. A. van der
Televisiezenders voor het gebied van ultrahoge frequenties **26**,161
Vredenbregt, J., zie Leeuwen, H. J. van
Vries, G. de, zie Bollée, B.
Vries, J. de
Spanningsoptische uitzettingscontrole van materialen voor glas-metaalaansmeltingen **22**,351
Vrijer, F. W. de
Overbrengingssystemen voor kleurentelevisie **27**,169
Waal, B. van der
Een eenvoudige analogon-rekenmachine voor het berekenen van het kleurpunt van een lichtbron **23**, 89
Waal, J. van der en J. C. Francken
Restgasonderzoek aan televisiebeeldbuizen met behulp van het omegatron **23**, 92
(zie ook rectificatie, jaarg. **23**, blz. 168)
Wagt, A. J. van der, zie Custers, J. F. H.
Wal, J. van der
Cirkelvormige optische absorptiewiggen **22**,418
—, zie Haisma, J.
Walling, J. C. en F. W. Smith
De vastestofmaser; principe en toepassing in de communicatie via satellieten **26**, 33
—, zie Orton, J. W.
Walop, J. N., zie Bruin, O. A. de
Walraven, A.
Regeling van het toerental van kleine inductiemotoren door middel van thyristors **28**, 1
Wanmaker, W. L., zie Bril, A.
Warmoltz, N. en E. Bouwmeester
Metalen vacuümapparatuur **21**,177
Weaver, J. A., zie Saraga, P.
Weber, C.
Het berekenen van potentiaalvelden en elektronenbanen met behulp van een elektronische rekenmachine **24**,130
Meting van de intensiteitsverdeling in de lichtstip van een katodestraalbuis **25**, 29
Weeda, M., zie Hurck, N. van
Weg, H. van de, zie Nijenhuis, W.
Weimer, K. R. U., zie Vlaardingerbroek, M. T.
Went, J. J.
De instrumentatie voor een subkritische homogene suspensiereactor, I. Motivering van de keus van een homogene suspensiereactor **21**, 85
Werner, H. W.
Analyse van vastestofoppervlakken in een massaspectrometer **27**,348
Wessels, J. H.
Een geheugenwiel voor magnetische registratie van televisiebeelden **22**, 1
—, zie Backers, F. Th.
Wessels, J. S. C. en M. van Koten-Hertogs
Fotosynthese. Een overzicht van de huidige stand van het onderzoek **27**,245
Westendorp, F. F., zie Buschow, K. H. J.
Westerhof, Th. J., zie Plantinga, G. H.
Westerkowsky, K., zie Zieler, E.
Westerlund, B., zie Hammar, M.
Westhoff, J. M.
Op zoek naar een maat voor de perceptieve arbeid . . **24**,362
Weijer, M. H. A. van de
Nieuwe mogelijkheden in natriumlampen **23**,226
—, zie T'jampens, G. R.
Wieringen, J. S. van
Het Mössbauer-effect en zijn toepassing bij het vastestofonderzoek **28**, 37
Willigen, P. C. van der
Enige moderne methodes voor het booglassen van staal **24**, 14
Wilting, J. J.
Parasitaire capaciteiten in neoninstallaties **21**,200
(zie ook rectificatie, jaarg. **21**, blz. 344)
Gelijkstroom-wisselstroomomzetters met bestuurbare siliciumgelijkrichters voor fluorescentieverlichting . **23**,255
Witteman, W. J.
Afgesmolten CO_2-lasers voor groot vermogen . . . **28**,193
Witteveen, K. W., zie Rakels, C. J.
Woodhead, A. W., D. G. Taylor en P. Schagen
Een experimentele beeldversterkerbuis met elektrostatische „Zoom"-optiek **25**,254
—, zie Schagen, P.
Woollons, D. J., zie Saraga, P.
Wulms, H. E. J., zie Niessen, C.
Wylie, A. W. en P. L. Eisler
Het opsporen van mineralen met neutronen **30**,109
Wijnen, M. D., zie Boter, P. A.
Wytzes, S. A.
Een automatische röntgenspectrometer **27**,304
Zaalberg van Zelst, J. J., zie Klein, G.
—, zie Nie, A. G. van
Zalm, P. en A. J. A. van Stratum
Naleveringskatodes met osmium **27**,123
—, zie Lemmens, H. J.
Zeida, R., zie Desvignes, F.
Zieler, E. en K. Westerkowsky
De Ampliscoop, een experimenteel toestel voor het harmoniseren van röntgenbeelden **24**,269
—, zie Elgström, H.
Zolingen, J. J. van
De instrumentatie voor een subkritische homogene suspensiereactor, IIIA. Het meten van kleine neutronenflux met behulp van snelle impulstelkanalen . **21**,136
Zonneveld, J. A.
Stereo-tekeningen, gemaakt met behulp van een digitale rekenmachine, III. Een oplossing van de Van der Pol-vergelijking, ruimtelijk voorgesteld **29**,114
Zonneveld, P. van
Machinale vervaardiging van ballons voor gloeilampen en radiobuizen **22**,333
Zwijsen, W. A. J. M., zie Overbeek, A. J. W. M. van
Zijlstra, H., zie Enz, U.
—, zie Haanstra, H. B.

Jaargang 30, 1969, no. 11/12 blz. 319-398 Verschenen 24 februari 1970

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!